



TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI EKSPERIMENTAL MEKANISME  
*ELECTROMAGNETIC VIBRATION ABSORBER*  
(EMVA) TERHADAP REDUKSI GETARAN DAN  
ENERGI LISTRIK BANGKITAN**

KARTIKA FIRDAUSI

NRP. 02111440000077

Dosen Pembimbing

Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya, 2018



**TUGAS AKHIR - TM184835**

**STUDI EKSPERIMENTAL MEKANISME  
*ELECTROMAGNETIC VIBRATION ABSORBER*  
(EMVA) TERHADAP REDUKSI GETARAN DAN  
ENERGI LISTRIK BANGKITAN**

**KARTIKA FIRDAUSI  
NRP. 02111440000077**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT**

**PROGRAM SARJANA  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA, 2018**





**FINAL PROJECT - TM184835**

***EXPERIMENTAL STUDY OF  
ELECTROMAGNETIC VIBRATION ABSORBER  
(EMVA) MECHANISM WITH VIBRATION  
MOTION REDUCTION AND ELECTRICAL  
ENERGY GENERATION***

KARTIKA FIRDAUSI  
NRP. 02111440000077

*Advisory Lecturer*  
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT

UNDERGRADUATE PROGRAM  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA, 2018



**STUDI EKSPERIMENTAL  
MEKANISME *ELECTROMAGNETIC  
VIBRATION ABSORBER* (EMVA)  
TERHADAP REDUKSI GETARAN DAN  
ENERGI LISTRIK BANGKITAN**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**KARTIKA FIRDAUSI**

NRP. 02111440000077

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. (Pembimbing)  
NIP. 197004121997032003
2. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng. (Penguji I)  
NIP. 197505111999031001
3. Aida Annisa Amin Daman, ST., MT. (Penguji II)  
NIP. 198907052015042005
4. Latifah Nurahmi, ST., M.Sc., Ph.D. (Penguji III)  
NIP. 1986201712037

**SURABAYA**

**NOVEMBER, 2018**



# **STUDI EKSPERIMENTAL MEKANISME ELECTROMAGNETIC VIBRATION ABSORBER (EMVA) TERHADAP REDUKSI GETARAN DAN ENERGI LISTRIK BANGKITAN**

Nama : Kartika Firdausi  
NRP : 02111440000077  
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.  
Laboratorium : Vibrasi dan Sistem Dinamis

## **ABSTRAK**

*Sebagian energi dari mesin-mesin di industri yang bekerja terbuang menjadi getaran. Getaran yang terjadi akan menimbulkan kerusakan pada elemen-elemen mesin dan mengurangi umur penggunaan dari mesin tersebut. Sehingga, diperlukan cara untuk mengurangi getaran yang terjadi pada mesin-mesin tersebut, salah satunya dengan menggunakan Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA). EMVA akan mereduksi getaran dan mengubahnya menjadi energi listrik yang selanjutnya dapat dimanfaatkan. EMVA bekerja sesuai dengan metode induksi listrik dan medan magnet.*

*Penelitian pada tugas akhir ini mengenai studi eksperimental mekanisme vibration absorber untuk energy harvesting dengan prinsip kerja elektromagnetik yang disebut sebagai Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA). Mekanisme EMVA dirancang untuk skala laboratorium dengan sistem utama yang diwakili oleh simulator getaran. Sistem utama terdiri dari massa utama berupa plat datar dan empat buah pegas dengan 2 variasi*



yang berbeda yaitu 3300 N/m untuk sisi kiri dan 2500 N/m untuk sisi kanan. Hal ini menyebabkan sistem mengalami gerak translasi dan pitching. Empat buah pegas tersebut dikenai gaya eksitasi di bawah plat yang bersumber dari motor DC (direct current) 24 volt, 250 watt. Eksperimen dalam penelitian dilakukan pada frekuensi operasi sebesar 40,6941 rad/s atau 6,4448 Hz dengan variasi jumlah lilitan kumparan sebesar 1300, 2600, dan 3500. Variasi lainnya yaitu amplitudo eksitasi sebesar 0,02 m, 0,03 m, 0,04 m dan posisi peletakan EMVA. Mekanisme EMVA dirancang dengan massa berupa magnet neodymium dan lempeng baja yang ditopang oleh pegas dengan rasio konstanta pegas sebesar 1:20 dari konstanta pegas ekivalen sistem utama, kemudian dibungkus oleh tabung akrilik yang dilengkapi dengan kumparan yang bervariasi jumlah lilitannya.

Pada penelitian ini, dihasilkan prototype EMVA sesuai rancangan yang telah dibuat. Eksperimen dalam penelitian ini dilakukan untuk sistem utama tanpa dan dengan penambahan EMVA yang diletakkan di atas plat exciter. Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan hasil berupa respon percepatan arah translasi dan pitching serta tegangan bangkitan untuk setiap variasi amplitudo eksitasi, jumlah lilitan kumparan EMVA dan posisi peletakannya pada plat exciter. Reduksi getaran sistem utama yang optimal didapatkan dari eksperimen untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 2 yaitu di antara pusat massa sistem utama dan pegas dengan konstanta pegas terkecil. Reduksi yang dihasilkan untuk arah translasi sebesar 71,04% dan 71,60% untuk arah pitching pada eksperimen

*menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 m. Sedangkan, energi listrik optimal yang dihasilkan sebesar 0,0266 volt.*

***Kata Kunci: Getaran, Elektromagnetik, Frekuensi, Amplitudo, Energi Listrik, Kumparan, Magnet, Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA).***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTROMAGNETIC  
VIBRATION ABSORBER (EMVA) MECHANISM  
WITH VIBRATION MOTION REDUCTION AND  
ELECTRICAL ENERGY GENERATION**

*Student's Name* : Kartika Firdausi  
*NRP* : 0211144000077  
*Advisory Lecturer* : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.  
*Laboratory* : Vibration and Dynamic System

**ABSTRACT**

*Some of the energy from machinery in the industry that works is wasted into vibration. Vibration that occurs will cause damage to the machinery elements and reduce the lifetime of the machine. So, a method is needed to reduce the vibration that occurs in these machines, one of them is by using the Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA). EMVA will reduce vibration and convert it into electrical energy which can then be utilized. EMVA works according to the method of electric induction and magnetic fields.*

*The research in this final project is about an experimental study of the mechanism of vibration absorber for energy harvesting by using the electromagnetic working principle that called as Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA). The mechanism of EMVA is designed for laboratory scale with the main system represented by a mechanical vibration*

*exciter as a simulator. The main system consists of the main mass in the form of a flat plate and four springs with 2 different variations, namely 3300 N / m for the left side and 2500 N / m for the right side. This causes the system moving on translational and pitching. The four springs are subjected to an excitation force under the plate sourced from a 24 volt DC (direct current) motor. Experiments in this study were carried out at operating frequencies of 40.6941 rad / s or 6.4448 Hz with variations in the number of coil turns of 1300, 2600, and 3500. Other variations were excitation amplitude of 0.02 m, 0.03 m, 0, 04 m and EMVA laying position. The mechanism of the EMVA is designed with masses in the form of neodymium magnets and steel plates which are supported by springs with a spring constant ratio of 1:20 of the equivalent spring main system, then wrapped by an acrylic tube equipped with coils that vary the number of its turns.*

*In this study, an EMVA prototype was produced according to the design that had been made. Experiments in this study were carried out for the main system without and with the addition of EMVA placed on the exciter plate. From the experiments that have been done, the results obtained in the form of a response acceleration direction of translation and pitching and generation voltage for each variation of excitation amplitude, turn's number of EMVA coils and placement position on the exciter plate. The optimal main system vibration reduction is obtained from experiments for the main system with the addition of EMVA variations in the number of turns 2600 placed in position 2 which is between the center of mass of the main system and the spring with the smallest spring constant.*

*The resulting reduction for the translation direction is 71.04% and 71.60% for pitching directions in the experiment using an excitation amplitude of 0.04 m. Meanwhile, the optimal electrical energy produced is 0.0266 volts.*

***Keywords: Vibration, Electromagnetic, Frequency, Amplitude, Electrical Energy, Coils, Magnet, Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA).***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Studi Eksperimental Mekanisme *Electromagnetic Vibration Absorber* (Emva) terhadap Reduksi Getaran dan Energi Listrik Bangkitan**”. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan program studi S-1 Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini banyak pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis, hingga akhirnya Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini, diantaranya:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Nashrullah Dwi Yuswono dan Ibu Elly Rahayu Prihatin, adik perempuan penulis Daniar Seri Firdausi, serta kerabat lainnya Effi Latiffianti, Derita Suryaningtyas, Akfin Fadilah, dan Ibu Ria Yudi Astuti yang selalu memberikan dukungan moril maupun material kepada penulis.
2. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng., Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja, MT., Ibu Aida Annisa Amin Daman, ST., MT., dan Ibu Latifah Nurahmi, ST.,



M.Sc., Ph.D selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran untuk Tugas Akhir ini.

4. Sahabat-sahabat penulis: Nabila Triviandra, Bima Setyo Prabowo, Fatir Rahmat, Nira Asfarina, Deajeng Prameswari, Andri Billikita, Faradilla Fauziah dan Rizky Nur Ariyanti yang telah membantu dan menemani penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Semua pihak yang telah memberikan dukungan dan doa untuk penulis: Izda, Engra, Ayup, Binta, Angel, Hanun, Riri, Pingkan, Fitri, Dhito, Fido, Ega, Amanda, warga Lab. Vibrasi, keluarga M57 dan seluruh Sarekat Merah Rakyat Mesin (SMRM).

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini jauh dari kata sempurna karena masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari pembaca agar dapat menjadi lebih baik untuk kedepannya. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan menjadi inspirasi bagi para pembaca.

Surabaya, November 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan .....	4
1.4 Batasan Masalah .....	5
1.5 Manfaat .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>7</b>
2.1 Teori Mekanika Getaran .....	7
2.2 <i>Base Motion Vibration</i> .....	7
2.3 <i>Forced Multi Degree of Freedom Vibration</i> .....	9
2.4 <i>Dynamic Vibration Absorber</i> .....	10
2.5 <i>Undamped Vibration Absorber</i> .....	11
2.6 <i>Damped Vibration Absorber</i> .....	14
2.7 Elektromagnetik .....	16
2.8 Penelitian Terdahulu .....	21
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>39</b>
3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian .....	39
3.2 Penjelasan <i>Flowchart</i> Penelitian.....	40
3.2.1 Studi Literatur .....	40
3.2.2 Identifikasi Permasalahan .....	41
3.2.3 Perancangan Mekanisme EMVA .....	41
3.2.4 Rancang Bangun .....	52
3.2.5 Parameter Penelitian .....	55
3.2.6 Eksperimen .....	62

3.2.7	Skema Pengujian.....	64
3.2.8	Pengambilan Data Eksperimen .....	65
3.2.9	Analisa Data dan Pembahasan .....	66
3.2.10	Kesimpulan .....	67
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN....</b>		<b>69</b>
4.1	Peralatan dan Instalasi Eksperimen .....	69
4.1.1	Sistem Utama .....	72
4.1.2	Sistem <i>Absorber (Electromagnetic Vibration Absorber)</i> .....	73
4.2	Analisa Perhitungan .....	75
4.2.1	Momen Inersia .....	76
4.2.2	Konstanta Pegas <i>Absorber</i> .....	77
4.2.3	Konstanta Redaman Pegas <i>Absorber</i> .....	78
4.2.4	Frekuensi Natural Sistem .....	81
4.3	Analisa Eksperimen.....	84
4.3.1	Analisa Eksperimen Sistem Utama tanpa EMVA	86
4.3.2	Analisa Eksperimen Sistem Utama dengan EMVA	89
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>125</b>
5.1	Kesimpulan.....	125
5.2	Saran.....	126
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>127</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>159</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 (a)Skema <i>Base Motion Vibration</i> ; (b) <i>Free Body Diagram</i> dari <i>Base Motion Vibration</i> (Rao, 2011).	7
Gambar 2.2 Grafik Hubungan (a) <i>Amplitude Ratio</i> dengan <i>Frequency Ratio</i> ; (b) <i>Phase Angle</i> dengan <i>Frequency Ratio</i> (Rao, 2011) .....	9
Gambar 2.3 Skema <i>Forced Multi DoF Vibration</i> (Rao, 2011).....	9
Gambar 2.4 Skema DVA tak teredam (Rao, 2011).....	11
Gambar 2.5 Efek Penggunaan <i>Undamped Vibration Absorber</i> terhadap Respon pada Sistem Utama (Rao, 2011).....	13
Gambar 2.6 <i>Damped Dynamic Vibration Absorber</i> (Rao, 2011).....	14
Gambar 2.7 Pengaruh dari <i>Damped DVA</i> terhadap Respon Sistem Utama (Rao, 2011).....	16
Gambar 2.8 Gerak Magnet dalam Kumparan (Fakhrudi, 2016).....	17
Gambar 2.9 Kuat Medan Magnet Generator Linier Penampang Melintang (Fakhrudi, 2016).....	19
Gambar 2.10 Respon Frekuensi dari Struktur Tak Teredam dengan DVA (Ch. & Ali, 2016).....	23
Gambar 2.11 Respon Frekuensi dari Struktur Teredam dengan DVA (Ch. & Ali, 2016).....	24
Gambar 2.12 <i>Energy Harvesting Dynamics Vibration Absorber</i> (Ch. & Ali, 2016) .....	25
Gambar 2.13 Hasil Foto dari Peralatan <i>Electromagnetic Vibration Absorber</i> (Jie & Kefu, 2006).....	27
Gambar 2.14 Skema Eksperimen EMVA (Jie & Kefu, 2006).....	28

Gambar 2.15 Grafik Hubungan antara <i>Frekuensi Absorber</i> dengan Arus Koil ( <i>Jie &amp; Kefu, 2006</i> ) .....	29
Gambar 2.16 Grafik Hubungan antara Frekuensi Penggerak dengan Sinyal Akselerasi ( <i>Jie &amp; Kefu, 2006</i> ) .....	30
Gambar 2.17 Model Rangkaian Ekivalen Generator Kantilever Piezoelektrik ( <i>Khaligh, 2010</i> ) .....	32
Gambar 2.18 Grafik Hubungan <i>Output</i> Arus dengan Resistansi yang Terhubung ( <i>Khaligh, 2010</i> ).....	33
Gambar 2.19 Generator Tenaga Elektromagnetik (a)Resonansi; (b)Rotasi; (c)Perangkat Hibrid ( <i>Khaligh, 2010</i> ) .....	33
Gambar 2.20 Skema Generator Elektromagnetik oleh William ( <i>Khaligh, 2010</i> ) .....	35
Gambar 2.21 Skema Generator <i>Axial-Flux</i> oleh Holmes ( <i>Khaligh, 2010</i> ) .....	37
Gambar 3.1 Flowchart <i>Penelitian</i> .....	40
Gambar 3.2 (a)Rancangan EMVA tampak isometri; (b)Bagian-bagian EMVA.....	42
Gambar 3.3 Rancangan Mekanisme Sistem Utama Simulator Getaran ( <i>Rachman, 2017</i> ) .....	43
Gambar 3.4 Rancangan Gabungan Sistem Utama dengan EMVA ( <i>Rachman, 2017</i> ) .....	43
Gambar 3.5 Permodelan Sistem Dinamis (a)tanpa EMVA; (b)dengan EMVA.....	44
Gambar 3.6 <i>Free Body Diagram</i> dari Model Dinamis Sistem Utama tanpa EMVA (a)translasi; (b)rotasi .....	46
Gambar 3.7 <i>Free Body Diagram</i> Sistem Utama dengan EMVA.....	50
Gambar 3.8 <i>Shell Body</i> EMVA.....	53
Gambar 3.9 Magnet sebagai Komponen EMVA .....	53
Gambar 3.10 Kumparan Kawat pada EMVA .....	54

Gambar 3.11 Pegas EMVA .....	55
Gambar 3.12 Diagram Alir Sistematika Eksperimen ....	63
Gambar 3.13 Skema Pengujian Gerak Translasi ( <i>Syahir, 2018</i> ).....	64
Gambar 3.14 Skema Pengujian Gerak Translasi dan <i>Pitching</i> ( <i>Syahir, 2018</i> ).....	65
Gambar 4.1 Peralatan Penunjang Eksperimen (a) <i>Power Supply</i> ; (b) <i>Tachometer</i> ; (c) <i>Probe Accelerometer</i> ; (d) <i>Probe Voltmeter</i> ; (e)Kabel Penghubung; (f) <i>Oscilloscope</i> ; (g)Adaptor.....	70
Gambar 4.2 Instalasi Eksperimen Sistem Utama (a)tanpa EMVA; (b)dengan EMVA .....	71
Gambar 4.3 Sistem Utama.....	72
Gambar 4.4 <i>Electromagnetic Vibration Absorber</i> (EMVA).....	73
Gambar 4.5 Komponen-komponen EMVA (a)Pegas dan Alas; (b)Tabung dan Kumparan; (c)Magnet dan Lempeng Baja; (d)Baut dan Mur.....	74
Gambar 4.6 Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i>	75
Gambar 4.7 Momen Inersia Plat <i>Exciter</i> .....	76
Gambar 4.8 Hasil Pengujian Redaman Pegas EMVA...	78
Gambar 4.9 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> Pengujian Redaman EMVA .....	79
Gambar 4.10 <i>Bodediagram</i> Sistem Utama tanpa EMVA dan dengan EMVA Variasi Amplitudo Eksitasi 0,04 m	82
Gambar 4.11 <i>Bodediagram</i> Sistem Utama tanpa EMVA dan dengan EMVA Variasi Amplitudo (a)0,02m; (b)0,03m .....	84
Gambar 4.12 (a)Grafik RMS 2 DOF Sistem Utama tanpa EMVA; (b)Posisi Peletakan <i>Probe</i> pada Plat <i>Exciter</i> ...	87
Gambar 4.13 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> tanpa EMVA (a)Translasi; (b) <i>Pitching</i> .....	88

Gambar 4.14 Hasil <i>Filtering</i> dan <i>Smoothing</i> dengan Penambahan EMVA (a)Translasi; (b) <i>Pitching</i> ; (c)Voltase; (d)Posisi Peletakan EMVA .....	90
Gambar 4.15 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Linear</i> Variasi Jumlah Lilitan 1300; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .....	93
Gambar 4.16 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Linear</i> Variasi Jumlah Lilitan 2600; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .....	94
Gambar 4.17 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Linear</i> Variasi Jumlah Lilitan 3500; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .....	96
Gambar 4.18 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Linear</i> Variasi Posisi 1; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .	98
Gambar 4.19 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Linear</i> Variasi Posisi 2; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .	99
Gambar 4.20 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Linear</i> Variasi Posisi 3; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i>	100
Gambar 4.21 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Angular</i> Variasi Jumlah Lilitan 1300; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .....	103
Gambar 4.22 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Angular</i> Variasi Jumlah Lilitan 2600; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .....	104
Gambar 4.23 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Angular</i> Variasi Jumlah Lilitan 3500; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .....	106
Gambar 4.24 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Angular</i> Variasi Posisi 1; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i>	108
Gambar 4.25 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Angular</i> Variasi Posisi 2; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i>	109

Gambar 4.26 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Angular Variasi</i> Posisi 3; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i>	110
Gambar 4.27 (a)Grafik Posisi Peletakan EMVA terhadap Reduksi Respon Getaran Arah Translasi; (b) Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .....	113
Gambar 4.28 (a)Grafik Posisi Peletakan EMVA terhadap Reduksi Respon Getaran Arah <i>Pitching</i> ; (b) Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .....	115
Gambar 4.29 (a)Grafik Tegangan Bangkitan Hasil Eksperimen; (b)Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .....	117
Gambar 4.30 Grafik <i>Surface</i> Hubungan Jumlah Lilitan dan Posisi Peletakan EMVA terhadap (a)Reduksi Getaran Translasi; (b)Reduksi Getaran <i>Pitching</i> ; (c)Energi Bangkitan.....	120
Gambar 4.31 (a)Grafik Hubungan Posisi Peletakan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 2600 terhadap Reduksi Getaran Translasi dan <i>Pitching</i> ; (b)Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat <i>Exciter</i> .....	121
Gambar 4.32 Ilustrasi Peletakan EMVA dan <i>Probe Accelerometer</i> pada Plat <i>Exciter</i> (a)EMVA pada Posisi 1; (b)EMVA pada Posisi 2; (c)EMVA pada Posisi 3 .....	122
Gambar 4.33 Ilustrasi EMVA yang Digunakan dalam Eksperimen (a)Variasi Jumlah Lilitan 1300; (b)Variasi Jumlah Lilitan 2600; (c)Variasi Jumlah Lilitan 3500..	123



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter Sistem Utama .....	55
Tabel 3.2 Parameter <i>Electromagnetic Vibration Absorber</i> .....	61
Tabel 3.3 Variasi dalam Penelitian.....	62
Tabel 3.4 Hasil Eksperimen .....	66
Tabel 4.1 Spesifikasi Massa Absorber (EMVA) .....	74
Tabel 4.2 Parameter Penelitian Aktual Hasil Pengujian	80
Tabel 4.3 Nilai RMS Hasil Eksperimen Sistem Utama tanpa EMVA.....	88
Tabel 4.4 Data Hasil Eksperimen .....	91

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Dalam dunia industri, getaran merupakan hal yang tidak asing lagi. Suatu mesin yang ideal seharusnya tidak menimbulkan kebisingan atau getaran jika sedang dioperasikan. Hal ini dikarenakan seluruh energi yang dihasilkan oleh mesin diubah menjadi kerja. Pada kenyataannya, energi dari mesin-mesin tersebut sebagian terbuang menjadi getaran dan mesin tersebut menjadi bising ketika dioperasikan. Pada dasarnya, getaran merupakan gerakan teratur dari suatu benda dengan arah bolak balik dari titik kesetimbangannya. Getaran pada mesin terjadi ketika mesin tersebut dijalankan oleh motor sebagai sumber energinya. Getaran yang terjadi akan menimbulkan kerusakan pada elemen-elemen mesin dan mengurangi umur penggunaan dari mesin tersebut. Sehingga, diperlukan beberapa cara untuk mengurangi terjadinya getaran pada mesin-mesin tersebut agar tetap produktif, salah satunya dengan menggunakan suatu alat untuk mereduksi getaran yaitu *Dynamic Vibration Absorber* (DVA).

*Dynamic Vibration Absorber* (DVA) merupakan suatu peredam getaran dinamik yang bergerak secara bersama-sama dengan sistem utamanya untuk membantu meredam getaran yang terjadi pada sistem utama tersebut. Energi getaran merupakan suatu energi yang terbuang. Energi tersebut sebenarnya bisa dimanfaatkan sebagai energi lain, yaitu energi listrik. Banyak cara untuk memanfaatkan energi, salah satunya yaitu dengan

memanen energi yang terbuang (*energy harvesting*). *Energy harvesting* merupakan suatu proses menyerap energi eksternal (energi surya, energi panas, energi potensial, energi kinetik, dan getaran), lalu mengkonversi energi tersebut menjadi energi listrik yang berguna untuk alat elektronik. Pemanfaatan energi untuk menghasilkan energi listrik dapat dilakukan dengan menggunakan sebuah alat peredam getaran dengan prinsip kerja elektromagnetik.

Elektromagnetik adalah kombinasi antara medan listrik dan medan magnet yang berosilasi dan merambat melewati ruang serta membawa energi dari satu tempat ke tempat lainnya. Elektromagnetik merupakan sejenis magnet yang dibuat dengan melilitkan kawat pada suatu logam konduktor seperti besi atau baja. Lilitan pada logam tersebut disebut sebagai kumparan. Dengan metode ini, diharapkan dapat menghasilkan suatu daya dari medan magnet yang bertumbukan tegak lurus terhadap arah arus listrik yang dialirkan pada kumparan. Kawat atau penghantar akan menghantarkan arus bolak-balik dan gelombang elektromagnetik dirambatkan pada frekuensi yang sama dengan arus listrik. Sifat elektromagnetik dari logam adalah sementara. Logam hanya memiliki daya magnet ketika dialiri arus listrik, apabila arus listrik diputuskan maka logam akan kehilangan daya magnetisnya.

Dari latar belakang yang telah diuraikan, maka dilakukan suatu penelitian mengenai studi eksperimental mekanisme *Electromagnetic Vibration Absorber* (EMVA) yang berfungsi sebagai *energy harvesting* dengan metode elektromagnetik dan *vibration absorber* dari sistem yang bergetar pada skala laboratorium. Sistem yang bergetar

diwakili oleh simulator getaran, dimana sistem utama yang digunakan adalah suatu sistem yang terdiri dari massa utama yang ditopang dengan empat buah pegas. Terdapat dua buah pegas yang bernilai sama pada satu sisi (kiri) namun berbeda dengan dua buah pegas pada sisi lainnya (kanan). Sistem utama akan dioperasikan dengan menggunakan motor DC (*direct current*) yang membuat sistem mendapatkan gaya eksitasi dan dapat bergetar secara translasi dan rotasi. EMVA yang dirancang memiliki konstruksi lebih sederhana dibandingkan dengan penelitian sebelumnya oleh Jie dan Kefu pada tahun 2006. Pada penelitian ini, rancangan EMVA dibuat berdasarkan dengan metode induksi listrik atau secara elektromagnetik. Sehingga, getaran berlebih yang dihasilkan pada sistem utama dapat diredam oleh EMVA yang telah dirancang dan menghasilkan energi listrik yang selanjutnya dapat dimanfaatkan. Analisa yang dilakukan pada penelitian ini yaitu mengenai pengaruh variasi jumlah lilitan kumparan, amplitudo eksitasi dan posisi peletakan EMVA terhadap besarnya energi listrik yang dihasilkan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang di atas, diperlukan suatu rancangan mekanisme yang dapat mereduksi getaran secara translasi dan rotasi sekaligus dapat menghasilkan energi listrik dengan komponen elektromagnetik. Dengan demikian, rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana rancangan dari suatu model dan *prototype vibration absorber* dengan prinsip kerja elektromagnetik atau *Electromagnetic Vibration Absorber* (EMVA) yang dapat

mereduksi getaran dan menghasilkan energi listrik.?

2. Bagaimana pengaruh variasi amplitudo sistem utama terhadap respon getaran berupa percepatan yang dihasilkan dari *Electromagnetic Vibration Absorber* (EMVA)?
3. Bagaimana pengaruh variasi posisi peletakan *Electromagnetic Vibration Absorber* (EMVA) terhadap persentase reduksi getaran yang dihasilkan?
4. Bagaimana pengaruh variasi jumlah lilitan pada kumparan magnet yang digunakan sebagai komponen *Electromagnetic Vibration Absorber* (EMVA) terhadap energi listrik yang dihasilkan

### 1.3 Tujuan

Dari latar belakang dan rumusan masalah di atas, dapat ditentukan tujuan dari penelitian yang akan dilaksanakan, antara lain:

1. Merancang suatu model dan *prototype vibration absorber* dengan prinsip kerja elektromagnetik atau *Electromagnetic Vibration Absorber* (EMVA) yang dapat mereduksi getaran dan menghasilkan energi listrik.
2. Mengetahui pengaruh variasi amplitudo sistem utama terhadap respon getaran berupa percepatan yang dihasilkan dari *Electromagnetic Vibration Absorber* (EMVA).
3. Mengetahui pengaruh variasi posisi peletakan *Electromagnetic Vibration Absorber* (EMVA) terhadap persentase reduksi getaran yang dihasilkan.

4. Mengetahui pengaruh variasi jumlah lilitan pada kumparan magnet yang digunakan sebagai komponen *Electromagnetic Vibration Absorber* (EMVA) terhadap energi listrik yang dihasilkan.

#### 1.4 Batasan Masalah

Batasan yang digunakan untuk memfokuskan penelitian sesuai dengan ruang lingkup pada penjelasan latar belakang di atas, antara lain:

1. Pegas dan komponen elektik DVA memiliki konstanta elastisitas yang tetap.
2. Getaran dari luar mekanisme diabaikan.
3. Massa pegas diabaikan.
4. Nilai konstanta pegas memiliki nilai yang berbeda untuk sisi kiri dan kanan.
5. Getaran mekanisme dari sistem dianggap *rigid*.
6. Getaran ditinjau secara vertikal.
7. Putaran motor DC dianggap konstan.
8. Gerakan rotasi hanya ditinjau pada arah  $\theta$ .

#### 1.5 Manfaat

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai referensi dan *literature* untuk penelitian *vibration absorber with energy harvesting* dengan prinsip kerja elektromagnetik untuk mereduksi getaran dan menghasilkan energi listrik.
2. Sebagai sarana untuk mendapatkan pengetahuan mengenai rancang bangun suatu *vibration absorber with energy harvesting* dengan prinsip



kerja elektromagnetik untuk mereduksi getaran dan menghasilkan energi listrik.

3. Sebagai inovasi dalam bidang *energy harvesting* dari suatu getaran berlebih pada alat-alat mekanik yang kemudian dikonversikan menjadi energi listrik.

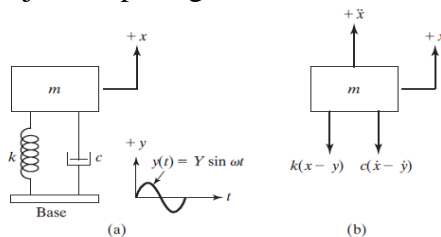
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Teori Mekanika Getaran

Secara umum, getaran didefinisikan sebagai gerakan bolak balik suatu benda dari posisi awal melalui titik kesetimbangan dengan periode, amplitudo, dan frekuensi tertentu. Getaran suatu sistem melibatkan transfer energi antara energi potensial dan energi kinetik. Jika sistem tersebut teredam, maka beberapa energi tersebut terdisipasi ke setiap siklus getar. Getaran dibagi menjadi dua kelompok umum, yaitu getaran bebas dan getaran paksa. Setiap komponen yang memiliki massa dan pegas dengan konstanta tertentu berarti memiliki frekuensi natural. Frekuensi natural inilah yang akan mempengaruhi respon getaran dari suatu sistem.

### 2.2 Base Motion Vibration

*Base motion vibration* merupakan getaran yang terjadi karena adanya pergerakan harmonis dari *base* suatu sistem yang mempengaruhi massa di atasnya. Skema *base motion vibration* ditunjukkan pada gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2.1 (a)Skema *Base Motion Vibration*; (b)*Free Body Diagram* dari *Base Motion Vibration* (Rao, 2011)

Pada gambar 2.1(a) di atas,  $y(t)$  merupakan simpangan dari base dan  $x(t)$  merupakan simpangan dari massa pada posisi *static equilibrium* dengan waktu  $t$ . Maka total simpangan dari pegas adalah  $(x - y)$  dan kecepatan relative dari *damper* adalah  $(\dot{x} - \dot{y})$ . Gambar 2.1(b) merupakan diagram bebas dari *base motion vibration* dengan persamaan gerak (2.1) berikut:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.1)$$

Jika  $y(t) = Y\sin\omega t$ , maka persamaan (2.1) menjadi

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= c\dot{y} + ky \\ &= kY\sin\omega t + c\omega Y\cos\omega t \\ &= A\sin(\omega t - \alpha) \end{aligned} \quad (2.2)$$

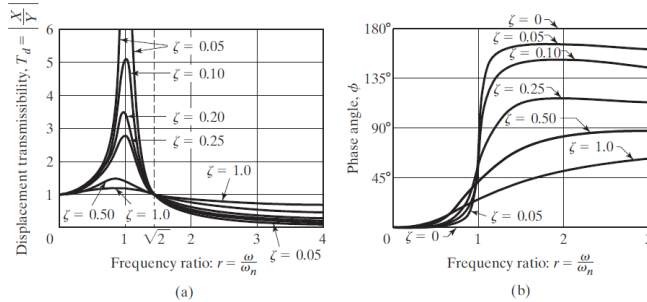
Dimana  $A = Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}$  dan  $\alpha = \tan^{-1} \left[ -\frac{c\omega}{k} \right]$ , maka respon dari massa,  $x_p(t)$  menjadi

$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha) \quad (2.3)$$

Dimana  $\phi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right)$ , sehingga dengan identitas trigonometri persamaan (2.3) dapat ditulis sebagai berikut

$$x_p(t) = X\sin(\omega t - \phi) \quad (2.4)$$

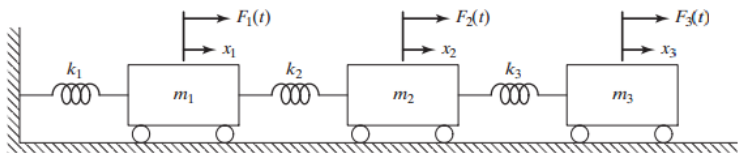
Dimana nilai  $X$  didapat dari nilai  $\frac{X}{Y}$  yaitu *displacement transmissibility* atau  $\frac{X}{Y} = \frac{\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$ , sedangkan nilai  $\phi$  didapat dari  $\phi = \tan^{-1} \left( \frac{mc\omega^2}{k(k - m\omega^2) + (c\omega)^2} \right)$ . Grafik hubungan *displacement transmissibility* dan sudut fase dengan rasio frekuensi pada sistem *base motion vibration* ditunjukkan pada gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Grafik Hubungan (a) *Amplitude Ratio* dengan *Frequency Ratio*; (b) *Phase Angle* dengan *Frequency Ratio* (Rao, 2011)

### 2.3 Forced Multi Degree of Freedom Vibration

Getaran mekanik paksa pada sistem derajat kebebasan ganda atau *forced multi degree of freedom (dof) vibration* adalah peristiwa getaran yang terjadi pada suatu sistem *multi dof* karena adanya gaya eksternal yang mengenai sistem tersebut, yang disebut sebagai *forced vibration*. Sistem derajat kebebasan ganda merupakan sistem yang memiliki beberapa komponen massa yang dihubungkan oleh elemen pegas yang masing-masing berjumlah lebih dari dua. Model dari sistem getaran *multi dof* ditunjukkan pada gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Skema *Forced Multi DoF Vibration* (Rao, 2011)

Gambar 2.3 di atas merupakan skema dari *forced multi dof vibration* yang menggambarkan suatu sistem

dengan massa dan pegas yang bergerak akibat adanya gaya  $F$ . Dari gambar 2.3 di atas, didapatkan persamaan gerak dengan menerapkan Hukum Newton kedua untuk setiap massa yang dituliskan pada persamaan (2.5) berikut.

$$m_i \ddot{x}_i + k_i x_i = \sum F_i \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) terdiri dari  $i = 1, i = 2, \text{ dan } i = 3$ . Dari persamaan (2.5) di atas, didapatkan matriks dari persamaan gerak untuk skema pada gambar 2.3 sebagai berikut:

$$[m]\ddot{x} + [k]x = [F] \quad (2.6)$$

dimana,  $[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$ ,  $[k] =$

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}, \quad \text{dan} \quad [F] = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix}.$$

Sehingga didapatkan persamaan matriks yang dituliskan pada persamaan (2.7) berikut:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

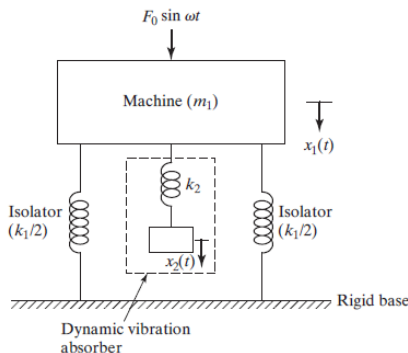
## 2.4 Dynamic Vibration Absorber

*Dynamics Vibration Absorber* (DVA) merupakan sistem tambahan yang terdiri dari massa *absorber* dan pegas yang berfungsi untuk mengurangi atau menghilangkan getaran yang tidak diinginkan. *Absorber*

yang dipasang akan bekerja dengan membuat sistem memiliki dua frekuensi natural. Pemasangan massa *absorber* pada massa utama ini menghasilkan sistem dengan 2 DOF, sehingga sistem tersebut akan memiliki dua frekuensi natural. DVA umumnya digunakan pada mesin yang beroperasi pada kecepatan konstan secara kontinu, karena getaran DVA cocok pada satu frekuensi tertentu. Oleh karena itu, DVA hanya akan efektif digunakan pada mesin yang rentang frekuensi operasinya sempit. DVA dapat menyerap berbagai arah eksitasi, hal ini bergantung pada komponen dan mekanisme DVA yang menyesuaikan dengan arah eksitasi dari sistem utama. Tanpa adanya DVA, getaran yang berlebihan pada sistem utama akan sangat sulit dikontrol.

## 2.5 Undamped Vibration Absorber

Skema sederhana dari sistem utama yang dipasangi DVA tidak teredam dapat dilihat pada gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Skema DVA tak teredam (Rao, 2011)

Dari gambar 2.4 di atas, didapatkan persamaan gerak yang dituliskan pada persamaan (2.8) dan (2.9) di bawah ini.

$$m\ddot{x}_1 + k_1x_1 + k_2(x_1 - x_2) = F_0 \sin \omega t \quad (2.8)$$

$$m\ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) = 0 \quad (2.9)$$

Dengan mengasumsikan solusi harmonik yaitu  $x_j(t) = X_j \sin \omega t$ ,  $j = 1, 2$  sehingga amplitudo *steady state* dari  $m_1$  dan  $m_2$  adalah

$$X_1 = \frac{(k_2 - m_2\omega^2)F_0}{(k_1 + k_2 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - k_2^2} \quad (2.10)$$

$$X_2 = \frac{k_2 F_0}{(k_1 + k_2 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - k_2^2} \quad (2.11)$$

Untuk membuat amplitudo  $m_1$  nol maka *numerator* dari persamaan (2.10) harus sama dengan nol, sehingga persamaan tersebut menjadi

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} \quad (2.12)$$

Massa utama tanpa DVA memiliki resonansi natural  $\omega^2 \cong \omega_1^2 = \frac{k_1}{m_1}$ , maka desain dari *absorber* persamaannya menjadi

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} = \frac{k_1}{m_1} \quad (2.13)$$

Amplitudo getaran mesin akan sama dengan nol apabila beroperasi pada frekuensi resonansi dengan mendefinisikan menjadi

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{k_1}, \omega_1 = \left(\frac{k_1}{m_1}\right)^{1/2} \quad (2.14)$$

sebagai frekuensi natural sistem utama dan

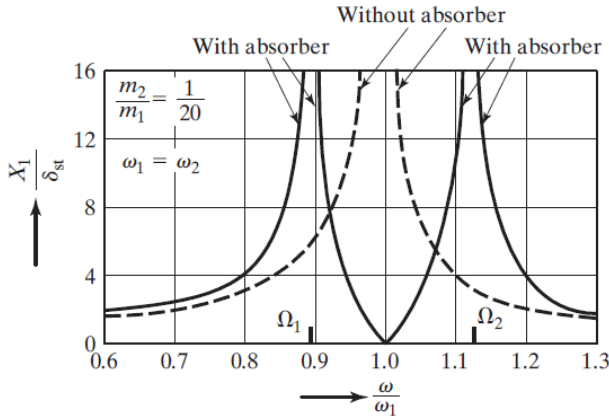
$$\omega_2 = \left(\frac{k_2}{m_2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

sebagai frekuensi natural sistem DVA. Sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (2.16)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (2.17)$$

Penambahan DVA pada sistem juga akan membagi dan mereduksi rasio frekuensi natural sistem menjadi dua bagian yang mana akan menimbulkan rasio frekuensi natural yang berbeda. Skema efek penggunaan DVA pada rasio amplitude respon sistem terhadap rasio frekuensi natural sistem ditunjukkan oleh gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Efek Penggunaan *Undamped Vibration Absorber* terhadap Respon pada Sistem Utama (Rao, 2011)



Gambar 2.5 di atas menunjukkan variasi amplitudo getaran massa utama ( $X_1/\delta_{st}$ ) dengan kecepatan sudut ( $\omega/\omega_1$ ). Pada frekuensi ini, persamaan (2.17) memberikan

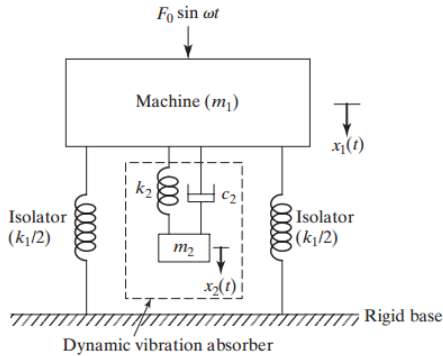
$$X_2 = -\frac{k_1}{k_2} \delta_{st} = -\frac{F_0}{k_2} \quad (2.18)$$

Hal ini menunjukkan bahwa gaya pegas berlawanan dengan eksitasi dan mereduksi gaya eksitasi di ( $k_2 X_2 = -F_0$ ) dan dinetralisasi. Dimensi dari DVA didapatkan melalui persamaan (2.18) dan (2.13) yaitu

$$k_2 X_2 = m_2 \omega^2 X_2 = -F_0 \quad (2.19)$$

## 2.6 Damped Vibration Absorber

*Damped Dynamic Vibration Absorber* merupakan tipe DVA yang menggunakan sebuah *damper*. *Damped* DVA berfungsi untuk menghilangkan puncak resonansi aslinya menjadi dua puncak baru. Amplitudo pada dua puncak baru memiliki nilai yang sangat besar sehingga perlu penambahan peredam untuk mereduksi amplitudo tersebut yang ditunjukkan pada gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6 Damped Dynamic Vibration Absorber  
(Rao, 2011)

Berdasarkan gambar 2.6 di atas, didapatkan persamaan gerak dari massa  $m_1$  dan  $m_2$  adalah sebagai berikut:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_0 \sin \omega t \quad (2.20)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) + c_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (2.21)$$

Dengan mengasumsikan penyelesaian harmonik adalah  $x_j(t) = X_j e^{i\omega t}$ , dan  $j = 1, 2$ , maka didapatkan amplitudo *steady state* dari  $m_1$  dan  $m_2$  sebagai berikut:

$$X_1 = \frac{F_0(k_2 - m_2\omega^2 + ic_2\omega)}{[(k_1 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - m_2k_2\omega^2] + ic_2\omega(k_1 - m_1\omega^2 - m_2\omega^2)} \quad (2.22)$$

$$X_2 = \frac{X_1(k_2 + ic_2\omega)}{(k_1 - m_2\omega^2 + ic_2\omega)} \quad (2.23)$$

Nilai  $X_1$  dan  $X_2$  pada persamaan (2.22) dan (2.23) di atas dapat dinyatakan dalam:

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \left[ \frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{1/2} \quad (2.24)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \left[ \frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

Keterangan:

$$\mu = m_2/m_1 = \text{Mass ratio}$$

$$= \text{Absorber mass / main mass}$$

$$\delta_{st} = F_0/k_1 = \text{Static deflection of the system}$$

$$\omega_a^2 = k_2/m_2 = \text{Square of natural frequency of the absorber}$$

$$\omega_n^2 = k_1/m_1 = \text{Square of natural frequency of main mass}$$

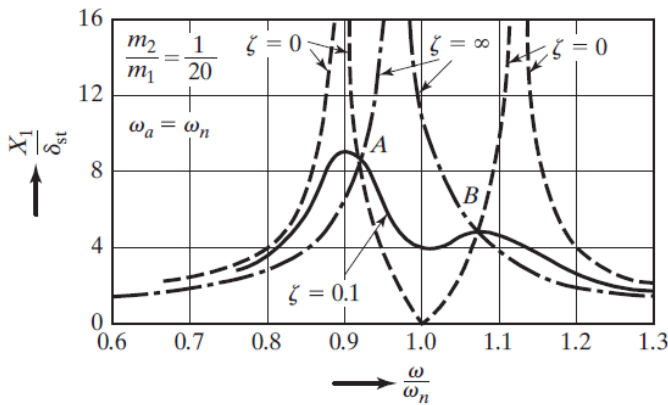
$$f = \omega_a/\omega_n = \text{Ratio of natural frequencies}$$

$$g = \omega/\omega_n = \text{Forced frequency ratio}$$

$$c = 2m\omega_n = \text{Critical damping constant}$$

$$\zeta = c_2/c_c = \text{Damping ratio}$$

Persamaan (2.24) menunjukkan nilai amplitudo getaran dari massa utama yang merupakan fungsi dari  $\mu, f, g$  dan  $\zeta$ . Grafik dari  $(X_1/\delta_{st})$  terhadap *forced frequency ratio* ( $g$ ) ditunjukkan pada gambar 2.7 berikut dengan nilai  $f = 1, \mu = \frac{1}{20}$ , dan variasi  $\zeta$  adalah 0, 0.1, dan  $\infty$ . Pada gambar 2.7 berikut terdapat respon ideal sistem dengan *damped* DVA nilai  $\zeta = 0,1$ .



Gambar 2.7 Pengaruh dari *Damped* DVA terhadap Respon Sistem Utama (Rao, 2011)

## 2.7 Elektromagnetik

Energi dapat dikategorikan menjadi banyak macam, namun terdapat dua bentuk energi mekanik yang dapat dikaitkan dengan pembahasan mekanisme permanen energi getaran, khususnya getaran dari gelombang laut yaitu dengan menggunakan energi potensial gravitasi yang terkait dengan posisi dan energi kinetik yang terkait dengan gerak magnet.

Michael Faraday (1791-18670) membuat suatu hipotesis bahwa medan magnet dapat menimbulkan arus

listrik. Dengan medan magnet atau fluks yang dapat berubah-ubah, maka pada kumparan akan timbul gaya gerak listrik (ggl) sebesar

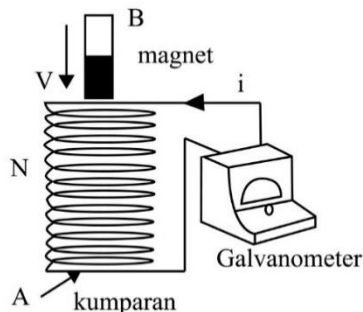
$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.26)$$

Karena  $\lambda = N\Phi$ , dengan  $\Phi$  merupakan hubungan dari kerapatan fluks magnet dan luas penampang kawat kumparan ( $\Phi = BA$ ), maka persamaan (2.26) menjadi

$$e = -N \frac{d(BA)}{dt} \quad (2.27)$$

Skema gerak magnet hipotesis Faraday yang diuraikan pada persamaan (2.26) dan (2.27) ditunjukkan pada gambar 2.8 di bawah. Nilai  $f = 1/\tau$  merupakan frekuensi gerak magnet yang tertinggal  $90^\circ$  dari fluks dan kerapatan fluks serta luas penampang kawat kumparannya, yang bernilai konstan sehingga dituliskan dalam persamaan (2.28) berikut ini

$$e = -N \cdot B \cdot A \cdot f \quad (2.28)$$



Gambar 2.8 Gerak Magnet dalam Kumparan (*Fakhrudi, 2016*)

Besarnya gaya gerak listrik yang dihasilkan tergantung pada jumlah lilitan ( $N$ ), besarnya fluks magnet

( $\Phi$ ), luasan penampang yang memotong gaya gerak listrik (A), dan frekuensi gerak magnet ( $f$ ). Apabila kumparan N lilitan ditembus fluks magnetik, maka pada kumparan timbul gaya gerak listrik (GGL) induksi yang disebut dengan  $\varepsilon_{ind}$  hukum Faraday yang dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$\varepsilon_{ind} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_{ind} = \frac{d(BA)}{dt} \quad (2.30)$$

dengan medan magnet (B) yang konstan maka

$$\varepsilon_{ind} = B \frac{dA}{dt} \quad (2.31)$$

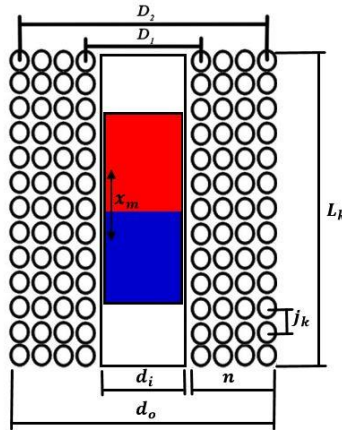
Dimana terdapat perubahan luasan kumparan yang dipotong oleh medan magnet, karena panjang kawat adalah konstan maka dapat dituliskan rumusan sebagai berikut:

$$\varepsilon_{ind} = B \cdot l_k \frac{dx_m}{dt} \quad (2.32)$$

Untuk  $\frac{dx_m}{dt}$  merupakan jarak simpangan magnet terhadap waktu yang merupakan fungsi kecepatan simpangan magnet, sehingga persamaannya dituliskan sebagai berikut:

$$\varepsilon_{ind} = B \cdot l_k \cdot v \quad (2.33)$$

Gambar 2.9 di bawah ini merupakan skema pergerakan magnet dalam kumparan yang menghasilkan persamaan tegangan dari generator linier.



Gambar 2.9 Kuat Medan Magnet Generator Linier  
Penampang Melintang (*Fakhrudi, 2016*)

Pada gambar 2.9 terlihat susunan kumparan tampak melintang dimana kuat medan magnet yang dihasilkan dipengaruhi oleh jumlah lilitan ( $n$ ), diameter kumparan ( $i$ ), jumlah kumparan yang tersusun vertical ( $j_k$ ), dan panjang kumparan ( $l_k$ ). Pada gambar 2.9 juga ditunjukkan diameter dalam ( $d_i$ ) dan diameter luar ( $d_o$ ) pada kumparan magnet linier.

Panjang diameter terdalam ( $D_1$ ) dan diameter terluar kumparan ( $D_2$ ) dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$D_1 = d_i + d_w \quad (2.34)$$

$$D_2 = d_i + n \cdot d_w \quad (2.35)$$

Untuk mencari keliling kumparan ( $k_k$ ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$k_k = \pi \cdot D$$

$$dk_k = \pi \cdot D \cdot dD$$

$$\begin{aligned}
\int dk_k &= \int \pi \cdot D \cdot dD \\
k_k &= \frac{1}{2} \pi D^2 \Big|_{D_2}^{D_1} \\
k_k &= \frac{\pi D_2^2}{2} - \frac{\pi D_1^2}{2} \\
k_k &= \frac{1}{2} (\pi D_2^2 - \pi D_1^2) \tag{2.36}
\end{aligned}$$

Substitusi persamaan 2.36 dengan 2.34 dan 2.35 menjadi

$$\begin{aligned}
k_k &= \frac{1}{2} (\pi (d_i + n \cdot d_w)^2 - \pi (d_i + d_w)^2) \\
k_k &= \frac{\pi}{2} (d_i^2 + 2 \cdot n \cdot d_i \cdot d_w + n^2 \cdot d_w^2 - d_i^2 \\
&\quad - 2 \cdot d_i \cdot d_w - d_w^2) \\
k_k &= \frac{\pi}{2} (n^2 \cdot d_w^2 - d_w^2 + 2 \cdot n \cdot d_i \cdot d_w \\
&\quad - 2 \cdot d_i \cdot d_w) \\
k_k &= \frac{\pi}{2} (n^2 - 1) d_w^2 + 2 \cdot d_i \cdot d_w (n - 1) \tag{2.37}
\end{aligned}$$

Panjang kumparan ( $l_k$ ) didapatkan dengan cara mengalikan jumlah susunan baris kawat kumparan ( $j_k$ ) dengan keliling kumparan ( $k_k$ ), sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
l_k &= j_k \cdot k_k \\
l_k &= \frac{x_m}{d_w} \cdot k_k \\
l_k &= \frac{x_m}{d_w} \cdot \frac{\pi}{2} (n^2 - 1) d_w^2 + 2 \cdot d_i \cdot d_w (n - 1) \\
l_k &= x_m \left( \frac{\pi}{2} (n^2 - 1) d_w + 2 \cdot d_i (n - 1) \right) \\
l_k &= \left( \frac{\pi}{2} (n^2 - 1) d_w + 2 \cdot d_i (n - 1) \right) x_m \tag{2.38}
\end{aligned}$$

Untuk  $\alpha = \left(\frac{\pi}{2}(n^2 - 1)d_w + 2 \cdot d_i(n - 1)\right)$ , maka persamaan (2.38) disederhanakan menjadi

$$l_k = \alpha \cdot x_m \quad (2.39)$$

Dengan  $x_m$  adalah perpindahan magnet ketika kumparan dialiri arus listrik. Sehingga, untuk mencari besar tegangan ( $\varepsilon_{ind}$ ), maka dilakukan substitusi persamaan 2.38 ke dalam persamaan (2.33) menjadi

$$\varepsilon_{ind} = B \cdot \alpha \cdot x_m \cdot v \quad (2.40)$$

Didapatkan persamaan gaya hambat elektromagnetik dengan melakukan substitusi persamaan (2.40) dan persamaan (2.39) ke dalam persamaan gaya Lorenz, sehingga dapat dituliskan dalam persamaan berikut

$$\begin{aligned} F_d &= B \cdot i \cdot l_k = B \cdot \frac{\varepsilon_{ind}}{R} \cdot l_k \\ F_d &= B \cdot \frac{(B \cdot \alpha \cdot x \cdot v)}{R} \cdot \alpha \cdot x_m \\ F_d &= \frac{B^2 \cdot \alpha^2}{R} x_m^2 \cdot v \end{aligned} \quad (2.41)$$

R merupakan resistor dari kawat yang digunakan untuk kumparan yang dipengaruhi oleh hambatan jenis ( $\rho$ ) dan panjang kawat ( $l_k$ ) terhadap luas penampangnya ( $A$ ). Resistor secara matematis adalah:

$$R = \frac{\rho l_k}{A} \quad (2.41)$$

## 2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi diantaranya penelitian mengenai *dynamic vibration absorber*, *electromagnetic*, dan *vibration absorber harvester*. Penelitian sebelumnya mengenai *energy harvesting dynamics vibration absorber* diambil dari jurnal internasional yang berjudul “*Energy Harvesting*



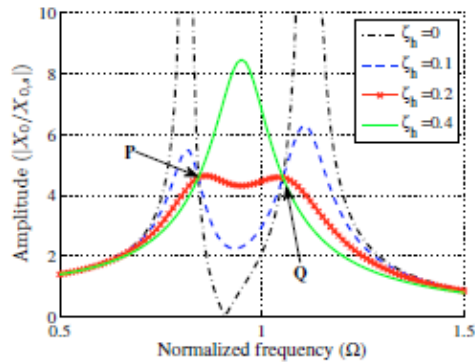
*from Vibration Absorber under Random Excitations*”, ditulis oleh Madhav Ch. dan Faruque Ali (2016). Pada jurnal tersebut dijelaskan bahwa *energy harvesting* DVA (EHDVA) terdiri dari mata air, redaman dan elemen piezoelektrik untuk memanen energi. Tumpukan piezoelektrik dilekatkan pada rangkaian listrik untuk menyimpan energi yang diambil (Ali dan Adhikari, 2013). Tumpukan piezoelektrik melakukan peran ganda, pertama meningkatkan redaman DVA sehingga mengurangi redaman tinggi DVA yang optimal dan kedua bertindak sebagai pengumpul energi.

Penelitian sebelumnya mengenai EHDVA mengacu pada eksitasi harmonis dan menentukan parameter optimal untuk EHDVA. Penelitian ini layak dilakukan di bawah eksitasi gempa bumi yang terjadi secara acak di alam dan dimodelkan sebagai proses Gaussian stasioner. Studi analitis disajikan dengan menggunakan vibrasi acak dengan teori linear probabilitas. Eksitasi dasar sistem dianggap sebagai sebuah proses acak yang merupakan efek dari keacakan terhadap mean dan variansi daya panen yang disajikan.

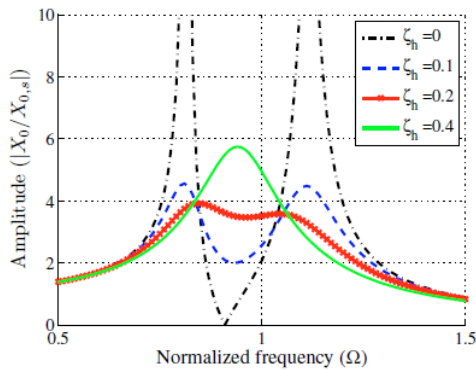
DVA digunakan sebagai perangkat kontrol getaran yang terdiri dari massa dan pegas dengan daerah kinerja yang lebih sempit dibandingkan dengan sistem utamanya. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Madhav, kinerja dari DVA menurun secara signifikan pada beberapa variasi dari frekuensinya. Parameter redaman DVA merupakan parameter *tuning* (yang dikenal dengan rasio frekuensi) dan rasio redaman.

Teori matematika pertama tentang DVA yang teredam dipresentasikan oleh Ormondroyd dan Hartog pada tahun 1928. Hartog (1985) memperkenalkan solusi

optimum DVA teredam yang melekat pada sistem primer bebas redaman. Teori tersebut menyatakan adanya dua titik tetap, yaitu P dan Q pada kurva respons frekuensi perpindahan struktur primer. Titik P dan Q tidak bergantung pada redaman pada absorber seperti ditunjukkan pada gambar 2.10 di bawah. Hal ini dapat mengurangi parameter optimasi dengan rasio frekuensi. Berdasarkan teorinya, Den Hartog menemukan parameter *tuning* optimum dan menentukan optimalisasi redaman *absorber* optimum



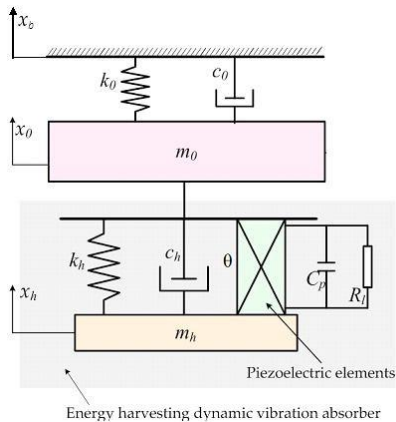
Gambar 2.10 Respon Frekuensi dari Struktur Tak Teredam dengan DVA (Ch. & Ali, 2016)



Gambar 2.11 Respon Frekuensi dari Struktur Teredam dengan DVA (Ch. & Ali, 2016)

Gambar 2.11 di atas menunjukkan respon frekuensi dari struktur teredam dengan DVA. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.11, ketika sistem primer teredam, kegunaan fitur titik tetap tidak lagi terlihat valid. Dengan demikian, untuk mendapatkan solusi bentuk tertutup yang tepat pada parameter *tuning* optimum atau rasio redaman optimum menjadi sangat sulit. Sejumlah penelitian berfokus pada perkiraan dan solusi numerik.

*Energy harvesting dynamics vibration absorber* (EHDVA) terdiri dari penyerap getaran dengan bahan piezoelektrik dan sirkuit listrik untuk memanen energi dari penyerap getaran.



Gambar 2.12 *Energy Harvesting Dynamics Vibration Absorber* (Ch. & Ali, 2016)

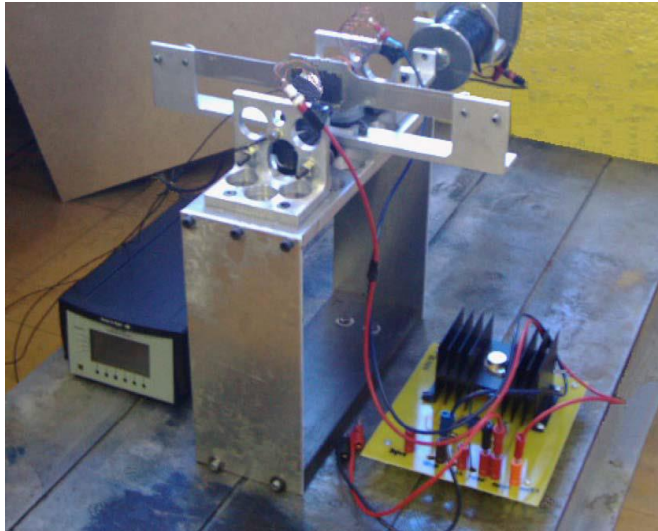
Gambar 2.12 di atas merupakan sistem dengan dua *degree of freedom* (DOF) elektro-mekanis yang digabungkan mewakili EHDVA. DVA ditambahkan ke massa utama dan terdiri dari pegas, redaman, elemen piezoelektrik dan sirkuit listrik untuk memanen energi dari penyerap getaran dinamis (Aliand Adhikari, 2013). Model elektromekanis dikenai eksitasi basa dan tegangan keluaran diperoleh pada tahanan beban. Teori getaran acak linier dipertimbangkan untuk pekerjaan analitis. Pada jurnal ini ditunjukkan bahwa getaran struktur dapat dikontrol dengan menggunakan EHDVA saat eksitasi dasarnya acak. Selain itu, jurnal ini menjelaskan bahwa getaran yang tidak diinginkan dapat digunakan untuk menghasilkan energi. Energi yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan massa strukturnya. Oleh karena itu, untuk badan yang cukup besar, seperti jembatan, EHDVA dapat digunakan untuk menjalankan perangkat sensor daya rendah dan dapat bekerja secara mandiri.

Penelitian terdahulu mengenai *electromagnetic vibration absorber* (EMVA) yang kekakuannya dapat diatur telah dilakukan oleh Jie dan Kefu pada tahun 2006. EMVA dirancang untuk mengurangi getaran dari sistem utama yang tereksitasi oleh gaya harmonik dengan variabel berupa frekuensi. EMVA terdiri dari balok aluminium yang dijepit dan magnet permanen yang tertanam di tengah balok dan ditempatkan di antara dua kutub elektromagnet berbentuk C. Frekuensi dan kekakuan dari EMVA dapat disesuaikan dengan memvariasikan arus dari elektromagnetnya.

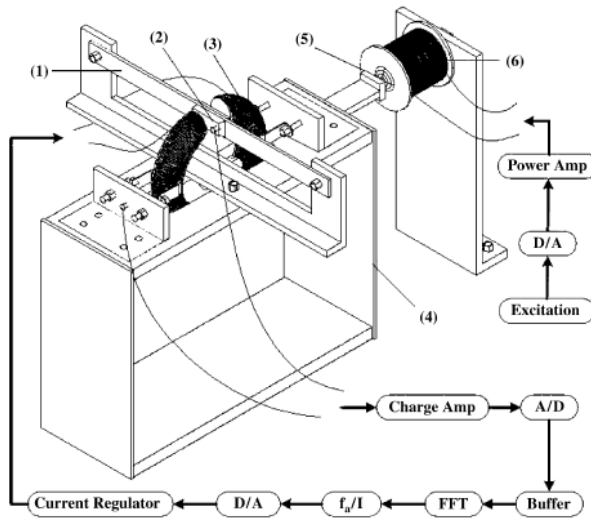
Pada penelitian ini, kekakuan yang efektif dari *absorber* ditentukan secara numerik dan divalidasi secara eksperimen. EMVA digunakan untuk mengetahui dua jenis variasi frekuensi yaitu: *multi-step* dan *linear*. Kedua frekuensi tersebut harus sama dengan frekuensi *absorber*-nya yang dapat dipastikan dari respon massa *absorber*-nya.

EMVA dengan kekakuan yang bisa disetel ini merupakan peredam getaran dengan sistem kontrol semi-aktif. Dalam bidang penelitian, sistem ini dapat menjelaskan gabungan dari sistem kontrol aktif dan pasif. Variasi kekakuan dari perangkat peredam dapat dicapai dengan memvariasikan jumlah efektif kumparan pada pegas helikal yang digunakan sebagai kekakuan dari *absorber*-nya (Franchek, Ryan, dan R.J. Bernhard, 1995). Mekanisme dari peredam getaran elektromagnetik dikembangkan oleh Mizuno dan Araki (1993) terdiri dari dua pasang *electromagnet* dan magnet permanen. Pasangan elektromagnet akan saling berinteraksi dengan magnet jika elektromagnet tersebut diberikan energi.

Perangkat ini merupakan perangkat yang digunakan pada penelitian kontrol getaran aktif. Pada penelitiannya, Trimboli, et al., (1994) menggunakan magnet permanen sebagai pegas untuk mengisolasi getaran.



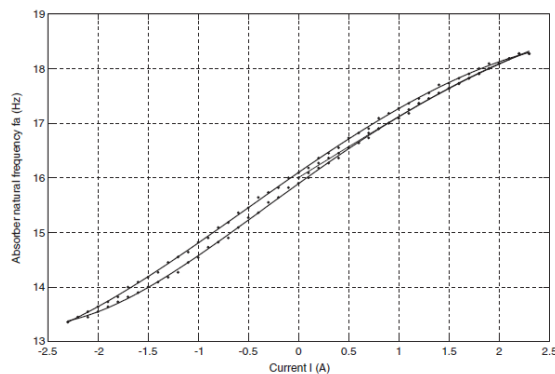
Gambar 2.13 Hasil Foto dari Peralatan *Electromagnetic Vibration Absorber* (Jie & Kefu, 2006)



Gambar 2.14 Skema Eksperimen EMVA (*Jie & Kefu, 2006*)

Gambar 2.13 menunjukkan foto penyerap getaran elektromagnetik yang telah dikembangkan dan terpasang pada sistem utama, hasil dari penelitian Jie dan Kefu (2006). Sedangkan, gambar 2.14 menunjukkan skema eksperimen yang dilakukan oleh Jie Liu. Sistem eksperimen tersebut terdiri dari tiga subsistem, antara lain: EMVA, sistem primer, dan sistem kontrol komputer. EMVA berisi komponen balok aluminium yang dijepit (1), magnet permanen (PM) (2) yang disematkan di tengah balok, dan elektromagnet (3). Balok magnet ditempatkan di antara kutub elektromagnet. Elektromagnet ini diciptakan dengan mengayunkan Gauge 18 kawat tembaga di sekitar inti baja berbentuk C. Magnet permanen berperan ganda, yaitu sebagai massa *absorber*

dan membentuk pegas magnetik yang berinteraksi dengan electromagnet melalui arus searah (DC) dari koil elektromagnetik. Sistem utama yang ditunjukkan oleh bagian (4) pada gambar 2.14 terdiri dari lempengan aluminium yang didukung oleh pelat aluminium di masing-masing sisi, bertindak seperti sistem derajat tunggal (dof). Sebuah magnet permanen kecil (5) terpaku pada batang aluminium yang dijepit pada massa utama. Magnet permanen ini berinteraksi dengan *shaker* elektromagnetik (6) untuk menghasilkan gaya tarik non-kontak. Tujuan penambahan bilah aluminium antara magnet permanen dan massa utamanya adalah untuk meminimalkan gangguan medan magnet dari elektromagnet yang memaksa dan medan magnet yang dihasilkan oleh elektromagnet absorber.



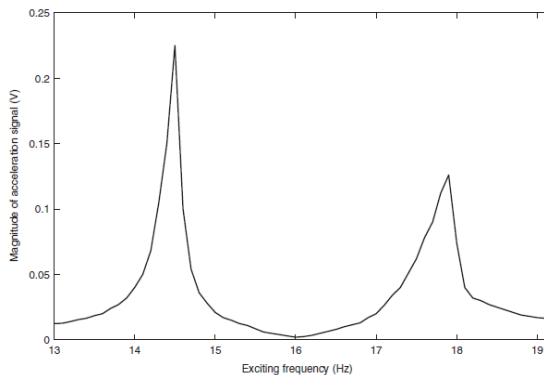
Gambar 2.15 Grafik Hubungan antara Frekuensi *Absorber* dengan Arus Koil (Jie & Kefu, 2006)

Eksperimen pada penelitian ini memiliki tiga tujuan, yaitu menguji sistem penyerap dan keseluruhan sistem, menentukan hubungan antara arus koil dan frekuensi



natural dari *absorber*, serta mengevaluasi keefektifan EMVA dalam penekanan vibrasi. Dengan pengujian *impact*, frekuensi sistem utama didapatkan sebesar  $f_p = 16$  Hz. Untuk mencegah resonansi, frekuensi penyerap harus diatur sebesar  $f_a = 16$  Hz ketika tidak ada arus yang dialirkan ke kumparan elektromagnet.

Gambar 2.15 di atas merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara frekuensi absorber dengan koil ketika dialiri atau diputus aliran arusnya. Grafik tersebut menunjukkan karakteristik histeresis ringan karena sifat baja. Untuk mengetahui hubungan antara respon steady dari keseluruhan sistem dan variasi frekuensi, massa utama ditarik oleh *shaker* dengan arus sinusoidal. Frekuensi sinyal sinusoidal dimulai dari 13 sampai dengan 19,2 Hz pada langkah 0,2 Hz (untuk setiap langkah), amplitudo steady state dari sinyal yang diukur.

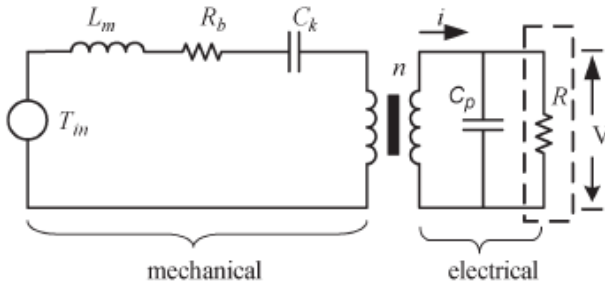


Gambar 2.16 Grafik Hubungan antara Frekuensi Penggerak dengan Sinyal Akselerasi (*Jie & Kefu, 2006*)

Hubungan antara besarnya sinyal akselerasi dengan frekuensi penggerak ditunjukkan oleh gambar 2.16. Grafik tersebut menunjukkan bahwa frekuensi resonansi dari keseluruhan sistem adalah 14,5 dan 17,9 Hz, besarnya titik anti resonansi mencapai titik terendah pada 16,0 Hz. Dari penelitian tersebut, didapatkan hasil bahwa EMVA mampu menyesuaikan nilai kekakuannya dalam seketika waktu. Pilihan untuk waktu perpindahan sistem dapat mempengaruhi transien. Respon bebas dari sistem sederhana pegas-massa menunjukkan bahwa kekakuan pegas berubah dari nilai rendah ke nilai tinggi pada kecepatan nol dan perpindahan tidak sama dengan nol, sehingga sistem dapat menginduksikan listrik.

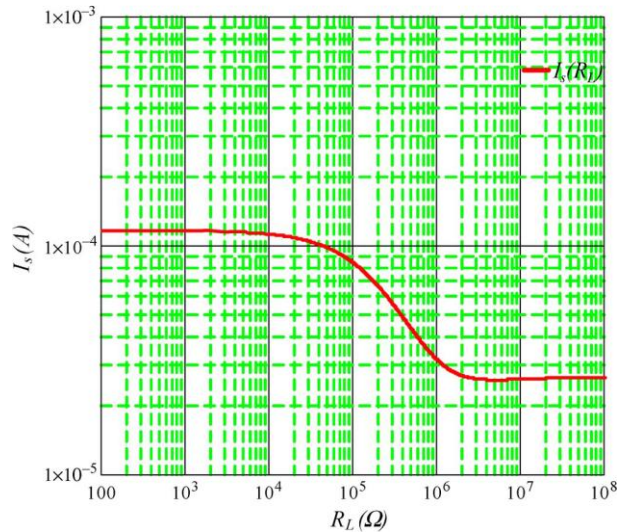
Penelitian sebelumnya oleh Khaligh (2010) mengenai *energy harvesting* secara kinetik dengan menggunakan teknologi piezoelektrik dan elektromagnetik. Generator piezoelektrik berfungsi untuk mengkonversi tegangan mekanik pada bahan aktif menjadi muatan listrik. Sedangkan, generator elektromagnetik menggunakan gerakan relatif antara sebuah konduktor dan fluks magnetik untuk menginduksi muatan pada konduktor.

Suatu balok *cantilever piezoelectric* merupakan suatu geometri yang paling umum digunakan untuk memanen energy dari getaran. Struktur kantilever memberikan frekuensi resonansi rendah serta mengurangi penambahan massa di ujung balok dalam volume struktur yang rendah dan tingkat regangan yang tinggi pada lapisan piezoelektrik (Beeby, 2006).



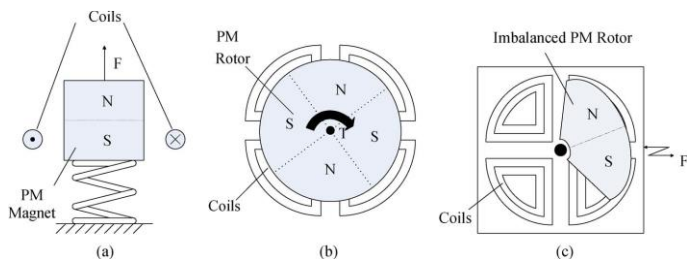
Gambar 2.17 Model Rangkaian Ekivalen Generator Kantilever Piezoelektrik (*Khaligh, 2010*)

Gambar 2.17 di atas menunjukkan model rangkaian ekivalen dari generator kantilever piezoelektrik yang digunakan untuk mengoptimalkan desain generator dengan batasan ukuran secara keseluruhan sebesar  $1 \text{ cm}^3$ . Dua desain dibuat dari PZT-5H yang menempel pada kuningan setebal 0,1 mm. Satu desain dibuat dari lapisan PZT ketebalan 0,28 mm, lebar 3,2 mm, dan panjang balok 11 mm yang menghasilkan daya keluaran sebesar  $375 \mu\text{W}$  dengan kecepatan *input*  $2,5 \text{ m/s}^2$  pada 120 Hz (Roundy, 2003). Representasi grafis mengenai hubungan *output* arus yang bervariasi dengan beban resistansi yang terhubung ditunjukkan oleh gambar 2.18.



Gambar 2.18 Grafik Hubungan Output Arus dengan Resistansi yang Terhubung (*Khaligh, 2010*)

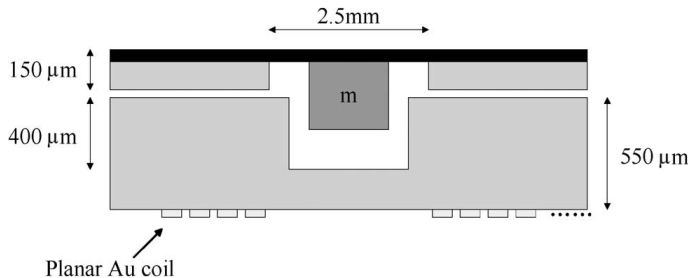
Secara umum, generator tenaga elektromagnetik dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu generator resonansi, generator rotasi, dan perangkat hibrid, seperti ditunjukkan pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Generator Tenaga Elektromagnetik  
(a)Resonansi; (b)Rotasi; (c)Perangkat Hibrid (*Khaligh, 2010*)

Generator resonansi beroperasi dalam mode osilasi karena getaran paksa. Pada generator ini terdapat perpindahan yang relatif kecil antara magnet permanen dan sebuah kumparan untuk memanfaatkan kekuatan dari getaran lingkungan. Generator resonansi biasanya beroperasi pada listrik yang relatif rendah frekuensinya dan daya rendah. Generator resonansi terdiri dari massa yang dipasang pada pegas dan bergetar relatif terhadap kerangkanya saat digerakkan oleh getaran eksternal. Energi mekanik dari perpindahan massa ditransformasikan menjadi energi listrik oleh perpindahan relatif massa magnet terhadap kumparan. Untuk mencapai daya maksimal, getaran masukan frekuensi harus sesuai dengan frekuensi resonansi mekanis.

Williams dan Yates (1995) mengusulkan satu jenis generator yang diaplikasikan dalam skala kecil dengan dimensi dimensi 5 mm x 5 mm x 1 mm, seperti ditunjukkan pada gambar 2.20. Perangkat tersebut diprediksikan memiliki energi bangkitan sebesar 1  $\mu$ W dengan frekuensi eksitasi pada 70 Hz dan 100  $\mu$ W pada 330 Hz. Kemudian, William dan Yates merancang generator yang terdiri dari membran melingkar yang fleksibel dan dilapisi dengan lapisan polimida 7  $\mu$ m, sebuah magnet SmCo dengan dimensi 1 mm x 1 mm x 3 mm dan berat 2,4 mg. Hasil percobaan menunjukkan bahwa perangkat tersebut dapat menghasilkan daya sebesar 0,3  $\mu$ W pada eksitasi frekuensi 4,4 kHz dan efek kekakuan pegas yang terjadi merupakan pengaruh dari peningkatan amplitudo (B.Williams, et al., 2001).



Gambar 2.20 Skema Generator Elektromagnetik oleh William (*Khaligh, 2010*)

Generator rotasi beroperasi dengan cara yang sama seperti pengoperasian generator resonansi (magnetik) berskala besar. Generator rotasi dirancang dengan menggunakan daya rotasi dari turbin kecil atau mesin pemanas, yang bisa memberikan rotasi secara terus-menerus yang bergerak di bawah torsi penggerak. Generator rotasi berukuran relatif lebih kecil dibandingkan dengan generator resonansi dan sering beroperasi pada tingkat yang lebih tinggi kecepatan rotasinya. Oleh karena itu, frekuensi listrik yang dihasilkan lebih besar jika dibandingkan dengan generator resonansi. Kecepatan rotasi yang tinggi memungkinkan generator menghasilkan kerapatan daya dalam skala besar.

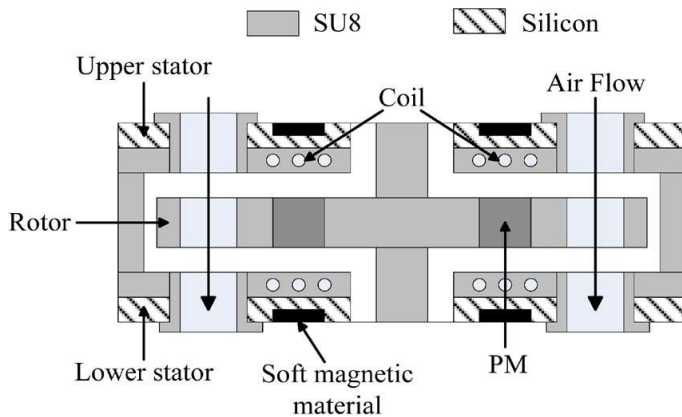
Wiegele (1996) mengusulkan *micro-turbo* generator planar bertenaga gas yang dioperasikan dengan generator listrik. Penulis memprediksikan daya keluaran sebesar 17 mW dengan persyaratan torsi minimal  $4,6 \times 10^{-3}$  Nm/m (dinormalisasi lebih dari ketebalan perangkat) untuk mempertahankan kecepatan konstan. Oleh karena itu, daya keluaran konstan dan tekanan reservoir sebesar 29,7 kPa menghasilkan kecepatan sudut sebesar 70.000

rad/menit. Sebuah prototipe turbin berdiameter 3,5 mm tersebut dibuat menggunakan Lithographie, Galvanoformung, Abining (LIGA) yang semua struktur dilapisi tembaga.

Generator hibrid dapat mengubah gerak linier menjadi gerakan rotasi dengan menggunakan ketidakseimbangan rotor. Pemanen energi getaran menghasilkan tenaga tanpa penggerak utama sumber berupa turbin atau mesin. Namun, agar mendapatkan hasil yang maksimal, generator resonansi dioperasikan hanya pada satu frekuensi tertentu. Oleh karena itu, generator frekuensi tidak cocok untuk getaran frekuensi yang bervariasi terhadap waktu. Sehingga diperlukan suatu teknologi generator non-resonansi untuk digunakan pada frekuensi yang bervariasi. Hal ini bisa dilakukan dengan menggunakan rotor yang tidak seimbang, yang akan diputar di bawah kecepatan paksa titik balik. Perangkat tersebut disebut sebagai generator hibrida karena merespon gerak mekanik resonan namun menghasilkan tenaga melalui perputaran mesin.

Holmes (2005) mengembangkan sebuah sistem pembangkit tenaga mikroturbine aliran aksial dengan memanfaatkan generator *permanent-magnet* aksial-fluks. Penampang melintang dari perangkat tersebut ditunjukkan pada gambar 2.21. Proses fabrikasi meliputi mikromachining silikon, elektroplating *multilayer* untuk bagian stator, dan etsa laser untuk rotor SU-8. Perangkat prototipe rotor ditunjang *ball bearing*, terletak antara bagian atas dan bawah dari stator yang memiliki gulungan dilapisi oleh tembaga (Cu). Dalam pengoperasiannya, magnet rotor dapat menghasilkan fluks magnet bervariasi

dalam kumparan stator mesin secara keseluruhan sebesar  $0,042 \text{ cm}^3$  dan daya bangkitan sebesar  $1,1 \text{ mW}$  per stator dengan rotasi rata-rata sebesar  $30 \text{ kr/menit}$  saat ditempatkan pada aliran udara  $35 \text{ L/menit}$ . Generator ini menunjukkan densitas daya hingga mencapai  $26,2 \text{ mW/cm}^3$ .



Gambar 2.21 Skema Generator *Axial-Flux* oleh Holmes (Khaligh, 2010)

Automatic Generating System (AGS) telah diperkenalkan pada tahun 1988 oleh Seiko di Jepang yang merupakan generator hibrida. Generator hibrida tersebut merupakan teknologi yang dimaksudkan untuk menghidupkan jam tangan (Paradiso & Starner, 2005). Perangkat ditunjukkan pada gambar 2.23. Gerakan manusia menyebabkan rotasi rotor yang tidak seimbang, dan kecepatan gear kereta api meningkatkan kecepatan putaran 100 kali untuk memutar generator *permanent magnet* (PM) yang kecil. Generator tersebut terdiri dari PM disket kecil yang berputar dalam armatur (suatu



kerangka penopang sistem dengan melawan gaya berat) magnetik untuk menghasilkan arus dalam kumparan. Arus ini disimpan dalam kapasitor yang memasok listrik untuk menggerakkan sirkuit ketepatan waktu dan menghasilkan daya rata-rata dalam aktivitas normal manusia dengan kisaran 5-10  $\mu\text{W}$  (Sasaki, 2005).

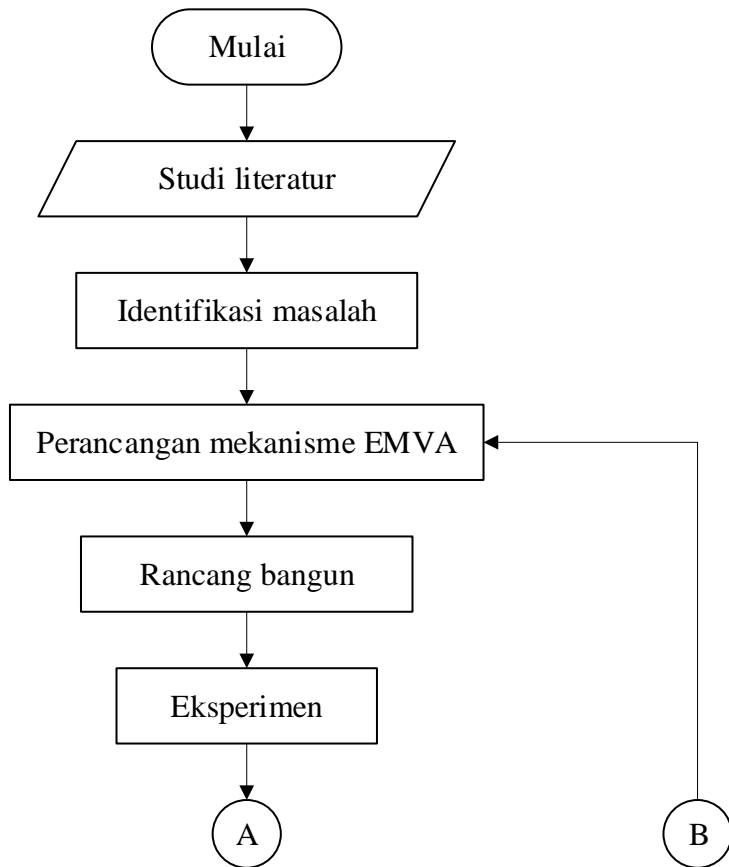
Generator elektromagnetik dapat menghasilkan keluaran arus tinggi namun voltasenya sangat rendah, biasanya kurang dari 1V. Perangkat makroskop mudah dibuat dengan menggunakan magnet curah dan suatu kumparan. Namun, kalibrasi sistem sulit karena sifat kemagnetan yang relatif rendah, dengan batasan jumlah kumparan, dan amplitudo getaran yang terlalu kecil. Kedua teknik pemanenan kinetik telah terbukti mampu menghasilkan daya dengan beban dari microwatt ke miliwatts (Khaligh, 2010).

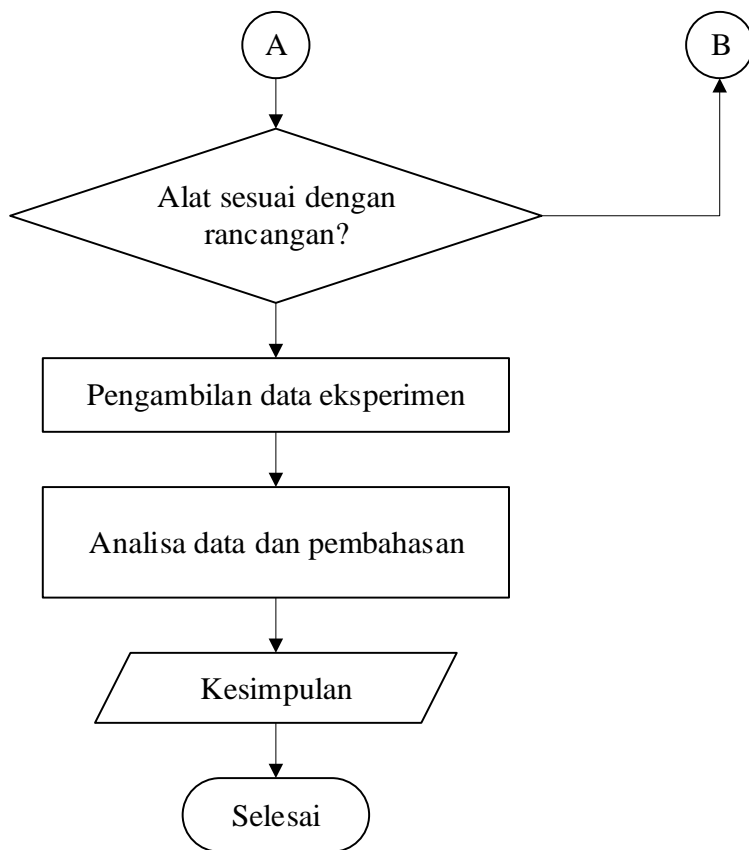
Penerapan panen energi kinetik telah berkembang dengan adanya getaran mekanis. Pemanenan tenaga kerja dari lingkungan untuk mengganti baterai sepenuhnya atau sebagian dapat bergantung pada energi kinetik yang tersedia dengan sumber energi piezoelektrik dan elektromagnetik. Generator piezoelektrik memiliki kelebihan struktur sederhana, mudah dalam perancangan, dan sedikit komponen tambahan. Selain itu, generator piezoelektrik mudah diintegrasikan ke dalam perangkat silikon dan selanjutnya dibuat dengan sirkuit mikroelektronika pada chip yang sama. Di sisi lain, meskipun tegangan outputnya sangat tinggi, arus yang mengalir keluar dari generator piezoelektrik terlalu rendah untuk digunakan karena impedansi yang sangat tinggi (Khaligh, 2010).

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 *Flowchart* Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini ditunjukkan dengan *flowchart* penelitian pada gambar 3.1 berikut.





Gambar 3.1 Flowchart *Penelitian*

### 3.2 Penjelasan *Flowchart Penelitian*

Berikut ini penjelasan secara rinci mengenai *flowchart* penelitian pada gambar 3.1 di atas.

#### 3.2.1 Studi Literatur

Langkah awal yang dilakukan pada penelitian ini adalah studi literatur mengenai beberapa teori,

diantaranya tentang getaran *multi degree of freedom forced vibration*, *base motion vibration*, *dynamic vibration absorber*, *energy harvesting* dan *electromagnetic*. Teori terkait dengan topik penelitian berdasarkan referensi dari *text book*, jurnal penelitian, dan tugas akhir sebelumnya.

### 3.2.2 Identifikasi Permasalahan

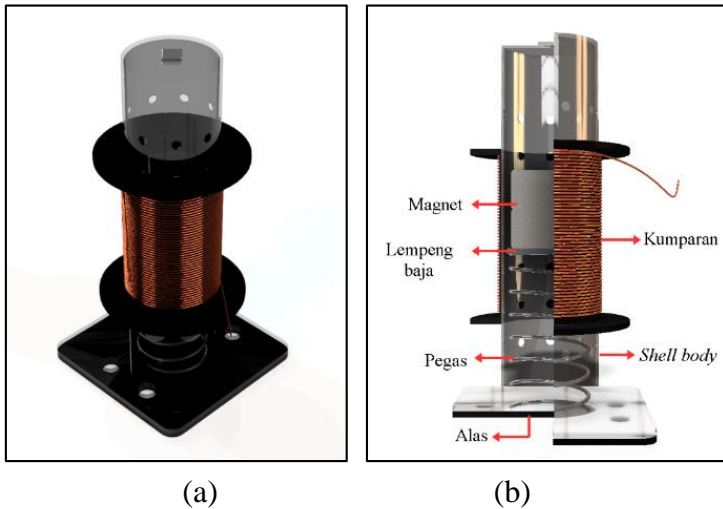
Identifikasi permasalahan yang dilakukan pada penelitian ini adalah *input* dan *output*. *Input* merupakan masukan yang diberikan pada penelitian ini, yaitu berupa variasi amplitudo yang digunakan sebagai sumber getar dari sistem, jumlah lilitan kawat kumparan pada EMVA dan posisi peletakan EMVA. *Output* merupakan hasil yang didapatkan dalam penelitian ini, yaitu respon reduksi getaran sistem utama dan tegangan listrik sebagai energi yang dihasilkan dari EMVA.

### 3.2.3 Perancangan Mekanisme EMVA

Mekanisme yang dirancang pada penelitian ini merupakan *vibration absorber* untuk *energy harvesting* dengan prinsip kerja elektromagnetik yang disebut sebagai *Electromagnetic Vibration Absorber* atau EMVA. Mekanisme EMVA dirancang untuk mengurangi getaran yang dihasilkan dari sistem utama. Sistem utama terdiri dari massa utama berupa plat datar dan empat buah pegas dengan 2 variasi yang berbeda setiap dua buah pegas pada sisi kanan dan sisi kiri, sehingga sistem akan mengalami gerak translasi dan *pitching*. Empat buah pegas tersebut dikenai gaya eksitasi di bawah plat *exciter* yang bersumber dari motor DC (*direct current*).

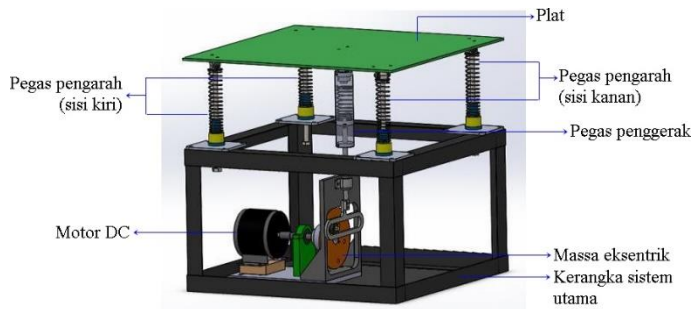
### 3.2.3.1 Rancangan Penelitian

Rancangan dari *Electromagnetic Dynamic Vibration Absorber* (EMVA) ditunjukkan pada gambar 3.2(a) di bawah ini. EMVA terdiri dari beberapa komponen seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.2(b) di bawah ini.



Gambar 3.2 (a)Rancangan EMVA tampak isometri;  
(b)Bagian-bagian EMVA

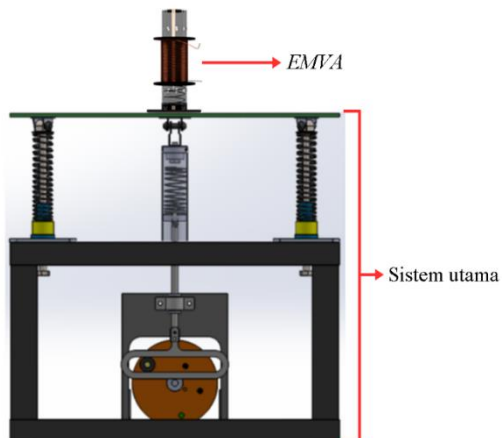
EMVA yang dirancang tampak seperti gambar di atas selanjutnya diletakkan di atas sistem utama. Rancangan sistem utama yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.3 di bawah.



Gambar 3.3 Rancangan Mekanisme Sistem Utama Simulator Getaran (*Rachman, 2017*)

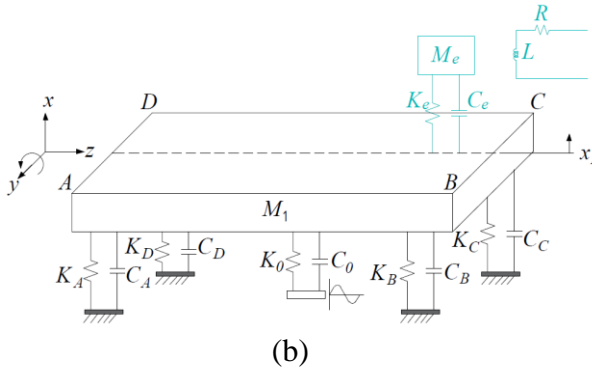
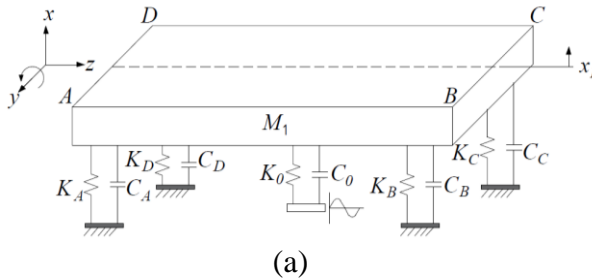
### 3.2.3.2 Penurunan Persamaan Gerak

Persamaan gerak sistem didapatkan dengan menyederhanakan rancangan gabungan sistem utama dengan EMVA, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.4 ke dalam pemodelan sistem dinamis dari sistem.



Gambar 3.4 Rancangan Gabungan Sistem Utama dengan EMVA (*Rachman, 2017*)

Pemodelan dinamis yang disederhanakan dari sistem utama tanpa EMVA dapat dilihat pada gambar 3.5(a) dan mekanisme gabungan dari sistem utama dengan EMVA pada gambar 3.5(b) berikut.



Gambar 3.5 Permodelan Sistem Dinamis (a)tanpa EMVA; (b)dengan EMVA

Keterangan:

$M_1$  : Massa sistem utama

$k_A$  : Konstanta pegas di titik A

$M_e$  : Massa *absorber* (EMVA)

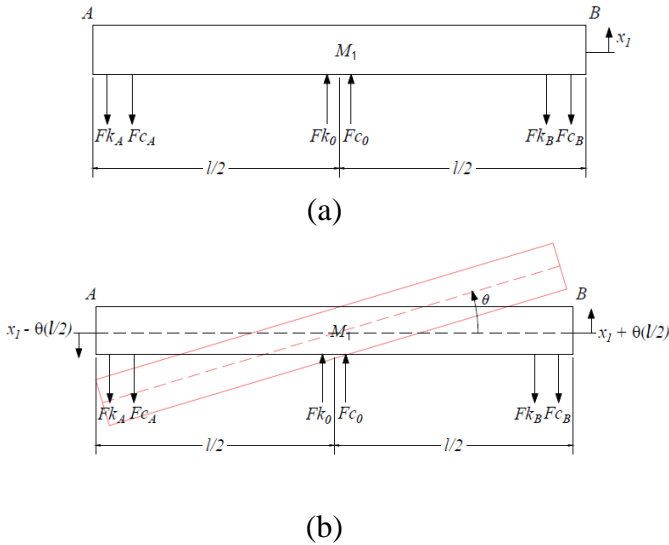
$c_A$  : Konstanta redaman di titik A

$k_B$	: Konstanta pegas di titik B	$c_B$	: Konstanta redaman di titik B
$k_C$	: Konstanta pegas di titik C	$c_C$	: Konstanta redaman di titik C
$k_D$	: Konstanta pegas di titik D	$c_D$	: Konstanta redaman di titik D
$k_0$	: Konstanta pegas eksitasi	$c_0$	: Konstanta redaman eksitasi
$k_e$	: Konstanta pegas <i>absorber</i>	$c_e$	: Konstanta redaman <i>absorber</i>
$x_0$	: Displacement eksitasi	L	: Induktansi elektromagnetik
$x_1$	: <i>Displacement</i> translasi sistem utama	R	: Resistor elektromagnetik
$x_e$	: <i>Displacement</i> translasi <i>absorber</i>		

a. Persamaan Sistem Utama tanpa EMVA

*Free body diagram* dari permodelan dinamis sistem utama tanpa EMVA untuk gerak translasi ditunjukkan pada gambar 3.6 (a) dan gambar 3.6 (b) untuk gerak rotasi.





Gambar 3.6 *Free Body Diagram* dari Model Dinamis Sistem Utama tanpa EMVA (a)translasi; (b)rotasi

Keterangan:

$Fk_0$  : Gaya eksitasi pegas dari motor penggerak (N)

$Fc_0$  : Gaya eksitasi redaman dari motor penggerak (N)

$Fk_i$  : Gaya pegas dari massa utama ( $m_1$ ) pada titik i (N)

$Fci$  : Gaya redaman dari massa utama ( $m_1$ ) pada titik i (N)

(i : A, B, C, atau D)

Dengan besar gaya yang bekerja masing-masing sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Fk_0 &= k_0(x_0 - x_1) & Fc_0 &= c_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) \\
 Fk_A &= k_A\left(x_1 - \theta \frac{l}{2}\right) & Fc_A &= c_A\left(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) \\
 Fk_B &= k_B\left(x_1 + \theta \frac{l}{2}\right) & Fc_B &= c_B\left(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2}\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Fk_C &= k_C \left( x_1 + \theta \frac{l}{2} \right) & Fc_C &= c_C \left( \dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2} \right) \\
 Fk_D &= k_D \left( x_1 - \theta \frac{l}{2} \right) & Fc_D &= c_D \left( \dot{x}_1 - \dot{\theta} \frac{l}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Pada sistem utama tanpa EMVA, massa utama menerima gaya eksitasi oleh pegas  $k_0, k_A, k_B, k_C$ , dan  $k_D$ , dengan *damper*  $c_0, c_A, c_B, c_C, c_D$ . Sistem utama memiliki 2 arah pergerakan yaitu translasi dan rotasi pada sumbu y (*pitching*) dengan 1 DOF (*degree of freedom*) untuk setiap arah pergerakan, sehingga sistem ini memiliki 2 DOF. Translasi merupakan pergerakan massa ke arah vertikal searah sumbu x. Sedangkan, *pitching* merupakan gerak rotasi massa pada sumbu y. Dari *free body diagram* pada gambar 3.6 (a), didapatkan persamaan gerak translasi dan rotasi dari massa utama ( $m_1$ ) sebagai berikut:

Persamaan gerak translasi massa utama ( $m_1$ )

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F &= m\ddot{x} \\
 Fk_0 + Fc_0 - Fk_A - Fc_A - Fk_B - Fc_B - Fk_C - \\
 Fc_C - Fk_D - Fc_D &= m_1\ddot{x}_1 \\
 k_0(x_0 - x_1) + c_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) - k_A \left( x_1 - \theta \frac{l}{2} \right) - \\
 c_A \left( \dot{x}_1 - \dot{\theta} \frac{l}{2} \right) - k_B \left( x_1 + \theta \frac{l}{2} \right) - c_B \left( \dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2} \right) - \\
 k_C \left( x_1 + \theta \frac{l}{2} \right) - c_C \left( \dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2} \right) - k_D \left( x_1 - \theta \frac{l}{2} \right) - \\
 c_D \left( \dot{x}_1 - \dot{\theta} \frac{l}{2} \right) &= m_1\ddot{x}_1 \\
 m_1\ddot{x}_1 + k_A x_1 - k_A \theta \frac{l}{2} + c_A \dot{x}_1 - c_A \dot{\theta} \frac{l}{2} + k_B x_1 + \\
 k_B \theta \frac{l}{2} + c_B \dot{x}_1 + c_B \dot{\theta} \frac{l}{2} + k_C x_1 + k_C \theta \frac{l}{2} + c_C \dot{x}_1 + \\
 c_C \dot{\theta} \frac{l}{2} + k_D x_1 - k_D \theta \frac{l}{2} + c_D \dot{x}_1 - c_D \dot{\theta} \frac{l}{2} &= k_0(x_0 - \\
 x_1) + c_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& m_1 \ddot{x}_1 + (k_A + k_B + k_C + k_D)x_1 - (k_A - k_B - \\
& k_C + k_D)\theta \frac{l}{2} + (c_A + c_B + c_C + c_D)\dot{x}_1 - (c_A - \\
& c_B - c_C + c_D)\dot{\theta} \frac{l}{2} = k_0 x_0 - k_0 x_1 + c_0 \dot{x}_0 - c_0 \dot{x}_1 \\
& m_1 \ddot{x}_1 + (k_A + k_B + k_C + k_D + k_0)x_1 - (k_A - \\
& k_B - k_C + k_D)\left(\frac{l}{2}\right)\theta + (c_A + c_B + c_C + c_D + \\
& c_0)\dot{x}_1 - (c_A - c_B - c_C + c_D)\left(\frac{l}{2}\right)\dot{\theta} = k_0 x_0 + \\
& c_0 \dot{x}_0
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Persamaan gerak rotasi massa utama ( $m_1$ )

$$\begin{aligned}
& + \mathfrak{U} \sum M = J \ddot{\theta} \\
& Fk_A \left(\frac{l}{2}\right) + Fc_A \left(\frac{l}{2}\right) - Fk_B \left(\frac{l}{2}\right) - Fc_B \left(\frac{l}{2}\right) - \\
& Fk_C \left(\frac{l}{2}\right) - Fc_C \left(\frac{l}{2}\right) + Fk_D \left(\frac{l}{2}\right) + Fc_D \left(\frac{l}{2}\right) = J_1 \ddot{\theta} \\
& k_A \left(x_1 - \theta \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) + c_A \left(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) - k_B \left(x_1 + \right. \\
& \left. \theta \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) - c_B \left(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) - k_C \left(x_1 + \right. \\
& \left. \theta \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) - c_C \left(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) + k_D \left(x_1 - \right. \\
& \left. \theta \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) + c_D \left(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) = J_1 \ddot{\theta} \\
& J_1 \ddot{\theta} - k_A \left(x_1 - \theta \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) - c_A \left(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) + \\
& k_B \left(x_1 + \theta \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) + c_B \left(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) + k_C \left(x_1 + \right. \\
& \left. \theta \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) + c_C \left(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) - k_D \left(x_1 - \right. \\
& \left. \theta \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) - c_D \left(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) = 0 \\
& J_1 \ddot{\theta} - k_A x_1 \left(\frac{l}{2}\right) + k_A \theta \left(\frac{l}{2}\right)^2 - c_A \dot{x}_1 \left(\frac{l}{2}\right) + \\
& c_A \dot{\theta} \left(\frac{l}{2}\right)^2 + k_B x_1 \left(\frac{l}{2}\right) + k_B \theta \left(\frac{l}{2}\right)^2 + c_B \dot{x}_1 \left(\frac{l}{2}\right) + \\
& c_B \dot{\theta} \left(\frac{l}{2}\right)^2 + k_C x_1 \left(\frac{l}{2}\right) + k_C \theta \left(\frac{l}{2}\right)^2 + c_C \dot{x}_1 \left(\frac{l}{2}\right) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& c_C \dot{\theta} \left(\frac{l}{2}\right)^2 - k_D x_1 \left(\frac{l}{2}\right) + k_D \theta \left(\frac{l}{2}\right)^2 - c_D \dot{x}_1 \left(\frac{l}{2}\right) + \\
& c_D \dot{\theta} \left(\frac{l}{2}\right)^2 = 0 \\
& J_1 \ddot{\theta} - (k_A - k_B - k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right) x_1 + (k_A + k_B + \\
& k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right)^2 \theta - (c_A - c_B - c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right) \dot{x}_1 + \\
& (c_A + c_B + c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right)^2 \dot{\theta} = 0
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Matriks dari persamaan gerak 2 DOF translasi dan rotasi di atas adalah:

$$\begin{aligned}
[m] &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & J_1 \end{bmatrix} \\
[k] &= \begin{bmatrix} (k_A + k_B + k_C + k_D + k_0) & -(k_A - k_B - k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right) \\ -(k_A - k_B - k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right) & (k_A + k_B + k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right)^2 \end{bmatrix} \\
[c] &= \begin{bmatrix} (c_A + c_B + c_C + c_D + c_0) & -(c_A - c_B - c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right) \\ -(c_A - c_B - c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right) & (c_A + c_B + c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right)^2 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

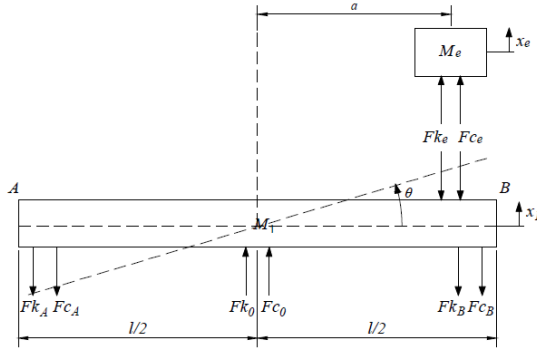
Sehingga, diperoleh persamaan matriks untuk persamaan gerak 2 DOF sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & J_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \\
& \begin{bmatrix} (c_A + c_B + c_C + c_D + c_0) & -(c_A - c_B - c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right) \\ -(c_A - c_B - c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right) & (c_A + c_B + c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right)^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \\
& \begin{bmatrix} (k_A + k_B + k_C + k_D + k_0) & -(k_A - k_B - k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right) \\ -(k_A - k_B - k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right) & (k_A + k_B + k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right)^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \theta \end{Bmatrix} = \\
& \begin{Bmatrix} k_0 x_0 + c_0 \dot{x}_0 \\ 0 \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

#### b. Persamaan Sistem Utama dengan EMVA

*Free body diagram* untuk permodelan sistem dinamis sistem utama dengan penambahan mekanisme EMVA

pada gambar 3.5(b) dapat dilihat pada gambar 3.7 di bawah ini.



Gambar 3.7 *Free Body Diagram* Sistem Utama dengan EMVA

Keterangan:

$$Fk_e = k_e(x_1 - x_e + \theta a)$$

$$Fc_e = c_e(\dot{x}_1 - \dot{x}_0 + \theta a)$$

Dengan penambahan EMVA pada sistem utama, massa utama menerima gaya eksitasi oleh pegas dan *damp*er dari motor, pegas dan *damp*er yang dipasang pada plat sebagai sistem utama, serta gaya eksitasi oleh pegas dan *damp*er elektromagnetik sebagai *absorber* dari sistem utama. Sehingga, dari *free body diagram* yang digambarkan pada gambar 3.7, didapatkan persamaan gerak sebagai berikut:

Persamaan gerak translasi massa utama dengan *absorber*:

$$+\uparrow \sum F = m\ddot{x}$$

$$Fk_0 + Fc_0 - Fk_A - Fc_A - Fk_B - Fc_B - Fk_C -$$

$$Fc_C - Fk_D - Fc_D - Fk_e - Fc_e = m_1\ddot{x}_1$$

$$\begin{aligned}
& k_0(x_0 - x_1) + c_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) - k_A\left(x_1 - \theta \frac{l}{2}\right) - \\
& c_A\left(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) - k_B\left(x_1 + \theta \frac{l}{2}\right) - c_B\left(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) - \\
& k_C\left(x_1 + \theta \frac{l}{2}\right) - c_C\left(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) - k_D\left(x_1 - \theta \frac{l}{2}\right) - \\
& c_D\left(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \frac{l}{2}\right) - k_e(x_1 - x_e + \theta a) - c_e(\dot{x}_1 - \dot{x}_e + \\
& \dot{\theta} a) = m_1 \ddot{x}_1 \\
& m_1 \ddot{x}_1 + (k_A + k_B + k_C + k_D + k_0 + k_e)x_1 - \\
& \left[\left((k_A - k_B - k_C + k_D)\left(\frac{l}{2}\right)\right) - k_e a\right] \theta - k_e x_e + \\
& (c_A + c_B + c_C + c_D + c_0 + c_e)\dot{x}_1 - \left[\left((c_A - c_B - \right.\right. \\
& \left.\left. c_C + c_D)\left(\frac{l}{2}\right)\right) - c_e a\right] \dot{\theta} - c_e \dot{x}_e = k_0 x_0 + c_0 \dot{x}_0
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Persamaan gerak translasi massa *absorber*:

$$\begin{aligned}
& + \uparrow \sum F = m \ddot{x} \\
& Fk_e + Fc_e = m_e \ddot{x}_e \\
& k_e(x_1 - x_e + \theta a) + c_e(\dot{x}_1 - \dot{x}_e + \dot{\theta} a) = m_e \ddot{x}_e \\
& m_e \ddot{x}_e - k_e x_1 + k_e x_e - k_e a \theta - c_e \dot{x}_1 + c_e \dot{x}_e - \\
& c_e a \dot{\theta} = 0
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Persamaan gerak rotasi massa utama dengan *absorber*:

$$\begin{aligned}
& + \cup \sum M = J \ddot{\theta} \\
& Fk_A\left(\frac{l}{2}\right) + Fc_A\left(\frac{l}{2}\right) - Fk_B\left(\frac{l}{2}\right) - Fc_B\left(\frac{l}{2}\right) - \\
& Fk_C\left(\frac{l}{2}\right) - Fc_C\left(\frac{l}{2}\right) + Fk_D\left(\frac{l}{2}\right) + Fc_D\left(\frac{l}{2}\right) - Fk_e a - \\
& Fc_e a = J_1 \ddot{\theta} \\
& k_A\left(x_1 - \theta \frac{l}{2}\right)\left(\frac{l}{2}\right) + c_A\left(\dot{x}_1 - \dot{\theta} \frac{l}{2}\right)\left(\frac{l}{2}\right) - k_B\left(x_1 + \right. \\
& \left. \theta \frac{l}{2}\right)\left(\frac{l}{2}\right) - c_B\left(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2}\right)\left(\frac{l}{2}\right) - k_C\left(x_1 + \theta \frac{l}{2}\right)\left(\frac{l}{2}\right) - \\
& c_C\left(\dot{x}_1 + \dot{\theta} \frac{l}{2}\right)\left(\frac{l}{2}\right) + k_D\left(x_1 - \theta \frac{l}{2}\right)\left(\frac{l}{2}\right) + c_D\left(\dot{x}_1 - \right.
\end{aligned}$$

$$\dot{\theta} \left(\frac{l}{2}\right) \left(\frac{l}{2}\right) - k_e(x_1 - x_e + \theta a) a - c_e(\dot{x}_1 - \dot{x}_e + \dot{\theta} a) a = J_1 \ddot{\theta}$$

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\theta} - \left[ \left( (k_A - k_B - k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right) - k_e a \right) x_1 + \left[ \left( (k_A + k_B + k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right)^2 \right) + k_e a^2 \right] \theta - k_e a x_e - \left[ \left( (c_A - c_B - c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right) - c_e a \right) \dot{x}_1 + \left[ \left( (c_A + c_B + c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right)^2 \right) + c_e a^2 \right] \dot{\theta} - c_e a \dot{x}_e \right] \right] \ddot{\theta} - c_e a \dot{x}_e = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Sehingga, diperoleh persamaan matriks untuk persamaan gerak 3 DOF sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_e \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_A + k_B + k_C + k_D + k_0 + k_e) & -k_e & -\left[ \left( (k_A - k_B - k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right) - k_e a \right) \right] \\ -k_e & k_e & -k_e a \\ -\left[ \left( (k_A - k_B - k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right) - k_e a \right) \right] & -k_e a & \left[ \left( (k_A + k_B + k_C + k_D) \left(\frac{l}{2}\right)^2 \right) + k_e a^2 \right] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_e \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (c_A + c_B + c_C + c_D + c_0 + c_e) & -c_e & -\left[ \left( (c_A - c_B - c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right) - c_e a \right) \right] \\ -c_e & c_e & -c_e a \\ -\left[ \left( (c_A - c_B - c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right) - c_e a \right) \right] & -c_e a & \left[ \left( (c_A + c_B + c_C + c_D) \left(\frac{l}{2}\right)^2 \right) + c_e a^2 \right] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_e \\ \theta \end{Bmatrix} = 0 \quad (3.7)$$

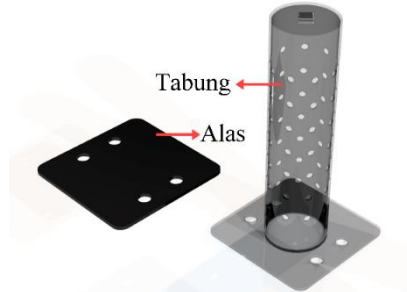
### 3.2.4 Rancang Bangun

Rancang bangun dilakukan sebagai proses pembuatan komponen-komponen dari EMVA yang telah dirancang. Berikut ini penjelasan mengenai material komponen EMVA yang digunakan:

#### 1. *Shell body*

*Shell body* yang ditunjukkan oleh gambar 3.8 di bawah merupakan kerangka luar dari EMVA yang berfungsi sebagai tempat untuk menyatukan seluruh

komponen. *Shell body* yang terbuat dari bahan akrilik tersusun dari alas dan tabung yang dirancang dengan sisi selimut berlubang agar medan magnet dari magnet di dalamnya dapat keluar dan memotong secara tegak lurus kawat kumparan, sehingga timbul induksi listrik.



Gambar 3.8 *Shell Body* EMVA

## 2. Magnet

Magnet digunakan sebagai massa *absorber* dan sumber medan magnet ketika sistem berosilasi. Magnet yang digunakan dalam penelitian ini adalah magnet *neodymium* dengan massa jenis  $7000 \text{ kg/m}^3$ . Magnet ini merupakan magnet permanen yang sangat kuat dan terbuat dari paduan *neodymium* dengan unsur penyusun berupa besi (Fe) dan boron (B).

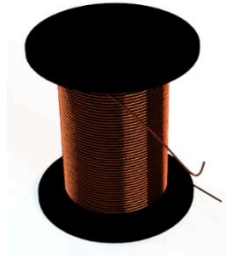


Gambar 3.9 Magnet sebagai Komponen EMVA



### 3. Kumparan Kawat

Kumparan pada komponen ini terbuat dari kawat tembaga dengan diameter sebesar 0,25 mm. Kumparan yang dibuat ini akan menangkap medan magnet yang keluar dari tabung secara tegak lurus dengan arah arus listrik yang mengalir sejajar dengan lilitan kawat, sehingga dapat menghasilkan induksi listrik. Kumparan ini disambungkan dengan *oscilloscope* menggunakan *probe voltmeter* untuk mengetahui besar tegangan yang dihasilkan oleh EMVA karena gaya eksitasi dari motor DC. Gambar 3.10 di bawah ini merupakan rancangan kumparan yang akan digunakan sebagai salah satu komponen EMVA.



Gambar 3.10 Kumparan Kawat pada EMVA

### 4. Pegas EMVA

Pegas EMVA digunakan untuk menopang magnet sebagai massa *absorber*. Pegas EMVA terbuat dari material baja dengan massa jenis  $7850 \text{ kg/m}^3$ . Kawat yang digunakan untuk lilitan pegas EMVA berukuran 2 mm. Gambar 3.11 berikut merupakan rancangan pegas EMVA yang akan digunakan sebagai salah satu komponen EMVA.



Gambar 3.11 Pegas EMVA

### 3.2.5 Parameter Penelitian

Parameter-parameter pada penelitian ini diperlukan untuk merancang bangun komponen-komponen EMVA dan agar eksperimen dapat dijalankan. Parameter yang dimaksud meliputi panjang, massa, koefisien pegas, dan koefisien redaman dari sistem utama dan sistem absorber (EMVA). Sistem utama merupakan alat *mechanical vibration exciter* dengan dimensi  $50 \times 50 \times 95 \text{ [cm}^3\text{]}$ . Parameter dari sistem utama yang digunakan dalam eksperimen ditunjukkan oleh tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Parameter Sistem Utama

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa sistem utama	$m_1$	6,7	$kg$
Konstanta pegas A	$k_A$	3300	$N/m$
Konstanta pegas B	$k_B$	2500	$N/m$
Konstanta pegas C	$k_C$	3300	$N/m$
Konstanta pegas D	$k_D$	2500	$N/m$

### 1. Massa Sistem Utama ( $m_1$ )

Massa sistem utama mencakup massa dari plat *exciter*, *spring rod* suspensi, dan poros penggerak dengan masing-masing nilai sebagai berikut:

Massa plat *exciter* = 5,9 kg

Massa *spring rod* = 0,6 kg

Massa poros penggerak = 0,2 kg

Dengan demikian, massa total dari sistem utama sebesar 6,7 kg. Plat *exciter* yang digunakan merupakan plat aluminium dengan dimensi  $50 \times 50 \times 0,6$  [ $cm^3$ ].

### 2. Massa Absorber ( $m_e$ )

Massa *absorber* ( $M_e$ ) yang digunakan dalam penelitian ini merupakan massa dari magnet dan lempeng baja. Berdasarkan teori mengenai *vibration absorber* oleh S. Rao dalam bukunya "*Mechanical Vibration*", massa efektif *absorber* yang digunakan adalah 5% dari massa utama, dengan persamaan matematis sebagai berikut:

$$M_e = \frac{1}{20} M_1 \quad (3.8)$$

Hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan 3.8 didapatkan massa *absorber* ( $m_e$ ) sebesar 0,34 kg. Massa merupakan perkalian volume ( $V$ ) dengan massa jenis material ( $\rho$ ). Dengan demikian, dapat diketahui dimensi magnet yang digunakan. Magnet yang digunakan merupakan magnet *neodymium* dengan massa jenis sebesar  $7000 \text{ kg/m}^3$ . Dengan melakukan perhitungan bahwasanya,

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.9)$$

Sehingga:

$$7000 \frac{kg}{m^3} = \frac{0,34 kg}{V}$$

$$V = 4,2857 \times 10^{-5} m^3 = 42,86 cm^3$$

Dengan diameter magnet yang digunakan sebesar 4 cm, maka:

$$V = \frac{1}{4} \pi d^2 t$$

$$42,86 = \frac{1}{4} \pi (4)^2 t$$

$$t = 3,41 cm \approx 4 cm$$

Dengan diketahui tinggi magnet dari perhitungan yang telah dilakukan, maka dapat ditentukan jumlah magnet yang dibutuhkan.

### 3. Konstanta Pegas

Nilai konstanta pegas eksitasi ( $k_0$ ) ditentukan dengan mempertimbangkan gaya dan respon yang dapat dihasilkan terhadap massa sistem utama. Nilai konstanta pegas penopang pada sistem utama ( $k_A, k_B, k_C$ , dan  $k_D$ ) didapatkan dari hasil perhitungan menggunakan Hukum Hooke dengan kondisi awal pegas sudah terdefleksi sebagian. Hukum Hooke menunjukkan bahwa besarnya gaya sama dengan perkalian dari nilai konstanta pegas ( $k$ ) dengan perubahan panjang pegas ( $\Delta x$ ) Secara matematis, Hukum Hooke dituliskan pada persamaan 3.10 berikut:

$$F = k \times \Delta x \quad (3.10)$$

Respon getaran translasi dan *pitching* didapatkan dari empat buah konstanta pegas, masing-masing nilainya  $k_A = 3300 \text{ N/m}$ ,  $k_B = 2500 \text{ N/m}$ ,  $k_C = 2500 \text{ N/m}$  dan  $k_D = 3300 \text{ N/m}$ . Berdasarkan teori mengenai *vibration absorber*, nilai konstanta pegas efektif yang digunakan untuk pegas *absorber* adalah 5% dari nilai ekuivalen konstanta pegas sistem utama. Dengan nilai ekuivalen pegas sistem utama sebagai berikut,

$$\begin{aligned} k_{eq} &= k_A + k_B + k_C + k_D \\ &= 3300 + 2500 + 2500 + 3300 \\ &= 11600 \text{ N/m} \end{aligned}$$

maka, nilai konstanta pegas efektif yang digunakan

$$\begin{aligned} k_e &= \frac{1}{20} k_{eq} \\ &= \frac{1}{20} \times 11600 \\ &= 580 \text{ N/m} \end{aligned}$$

Perhitungan spesifikasi pegas *absorber* yang direncanakan dilakukan berdasarkan teori *Helical Compression Spring* oleh Deutschman (1975) dalam buku "*Machine Design Theory and Practice*" dengan data yang diketahui adalah

<i>Shear modulus</i> baja (G)	$= 12 \times 10^6 \text{ psi}$
Konstanta pegas EMVA ( $k_e$ )	$= 580 \text{ N/m} = 3,3119 \text{ lbf/in}$
<i>Load</i> (P)	$= 0,34 \text{ kg} = 0,7496 \text{ lb}$

Jika spesifikasi pegas *absorber* yang diinginkan sebagai berikut:

Diameter kawat (D)	$= 2 \text{ mm} = 0,0787 \text{ in}$
--------------------	--------------------------------------

$$\begin{aligned}
\text{Jari-jari luar pegas } (r_o) &= 20 \text{ mm} \\
\text{Jari-jari dalam pegas } (r_i) &= 18 \text{ mm} \\
\text{Jari-jari relatif } (R) &= 19 \text{ mm} = 0,7486 \text{ in}
\end{aligned}$$

Maka dapat digunakan persamaan (3.11) di bawah ini untuk menentukan jumlah lilitan pada pegas ( $N_a$ ).

$$\begin{aligned}
N_a &= \frac{GD^4}{64kR^3} \quad (3.11) \\
&= \frac{(12 \times 10^6) \times (0,0787)^4}{64 \times 3,3119 \times (0,7486)^3} \\
&= 5,01 \approx 5 \text{ lilitan}
\end{aligned}$$

Untuk pegas jenis *squared end*:

$$\text{Jumlah lilitan total} = N_a + 1,5 = 6,5 \text{ lilitan}$$

Jika jumlah lilitan total sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan telah diketahui, maka dapat dilakukan perhitungan untuk mengetahui panjang kawat yang dibutuhkan ( $L$ ) untuk pegas *absorber* dengan menggunakan persamaan (3.12) di bawah ini.

$$\begin{aligned}
L &= 2\pi RN_a \quad (3.12) \\
&= 2\pi(0,7486)(5) \\
&= 23,506 \text{ in} \\
&= 597,0524 \text{ mm}
\end{aligned}$$

#### 4. Konstanta Redaman

Nilai konstanta redaman didapatkan dari perhitungan hasil uji redaman untuk komponen *linear bushing* motor, massa utama, dan EMVA. Pengujian dilakukan dengan memasang *probe accelerometer* pada komponen yang akan diuji kemudian diberikan gaya step berupa pembebanan awal. *Probe accelerometer*

dihubungkan pada *oscilloscope* untuk mengetahui respon getaran dari pegas yang diuji. Hasil pengujian redaman pegas yang terbaca pada *oscilloscope* berupa penurunan logaritmik. Selanjutnya, dilakukan *filtering* dan *smoothing* dengan menggunakan Simulink MATLAB untuk menghilangkan *noise* getaran yang terjadi selama pengambilan data. Dari hasil *filtering* dan *smoothing* dapat dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (3.13) berikut:

$$c = 2m \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{\frac{1}{\left[ \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{x_1}{x_{n+1}}\right)} \right]^2 + 1}} \quad (3.13)$$

Dimana  $x_1$  merupakan rata-rata amplitudo puncak 1 dengan lembah terdekat dan  $x_{n+1}$  merupakan rata-rata amplitudo puncak 1+n dengan lembah terdekat.

## 5. Frekuensi Natural

Eksperimen dalam penelitian ini menggunakan motor DC (*direct current*) 24 volt, 250 watt sebagai sumber getar sistem utama. Eksperimen dilakukan untuk mengetahui respon getaran dengan mengoperasikan motor DC dalam kondisi resonansi. Resonansi terjadi apabila besarnya frekuensi operasi sama dengan frekuensi natural sistem, dimana respon amplitudo yang dihasilkan dapat mencapai nilai maksimal. Frekuensi natural sistem secara matematis ditulis dalam persamaan (3.14) berikut:

$$\omega_n = \omega_f = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \quad (3.14)$$

Frekuensi natural sistem utama 2 DOF didapatkan dari perhitungan menggunakan Simulink MATLAB dengan nilai sebagai berikut:

$$\omega_{n1} = 40,7882 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{n2} = 77,1060 \text{ rad/s}$$

Tabel 3.2 berikut ini menunjukkan nilai parameter dari *absorber* yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 3.2 Parameter *Electromagnetic Vibration Absorber*

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Konstanta pegas EMVA	$k_e$	580	$N/m$
Massa <i>absorber</i> (EMVA)	$m_e$	0,34	$kg$
Diameter magnet	$d$	4	$cm$
Panjang kumparan	$l_k$	8	$cm$
Diameter kawat kumparan	$d_w$	0,25	$mm$
Hambatan jenis kawat	$\rho$	$1,68 \times 10^{-8}$	$\Omega m$

Penelitian ini menggunakan beberapa variasi, antara lain amplitudo eksitasi, jumlah lilitan, dan posisi peletakan EMVA. Tabel 3.3 berikut ini menunjukkan variasi yang digunakan pada penelitian ini.

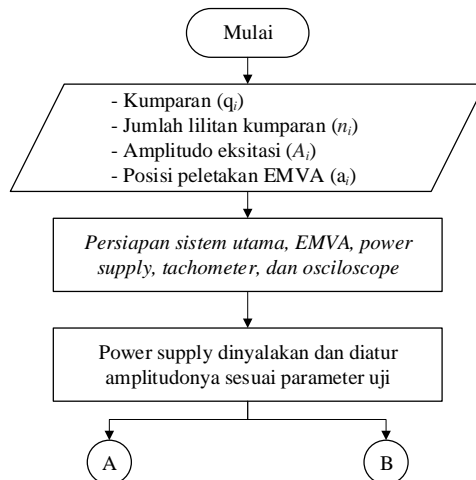


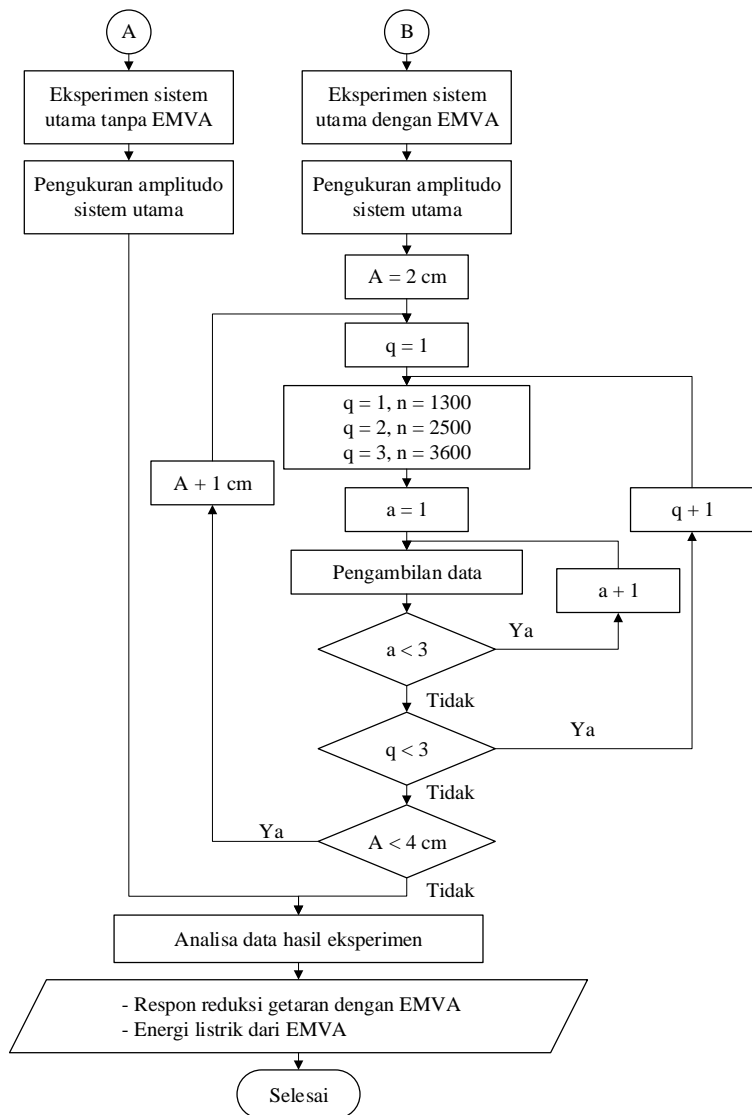
Tabel 3.3 Variasi dalam Penelitian

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Amplitudo eksitasi 1	$A_1$	0,02	$m$
Amplitudo eksitasi 2	$A_2$	0,03	$m$
Amplitudo eksitasi 3	$A_3$	0,04	$m$
Jumlah lilitan pertama	$n_1$	1300	-
Jumlah lilitan kedua	$n_2$	2600	-
Jumlah lilitan ketiga	$n_3$	3500	-
Posisi 1	$a_1$	0	$m$
Posisi 2	$a_2$	0,1	$m$
Posisi 3	$a_3$	0,2	$m$

### 3.2.6 Eksperimen

Pada penelitian ini, terdapat sistematika dalam melakukan eksperimen. Sistematika eksperimen ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.11 berikut.

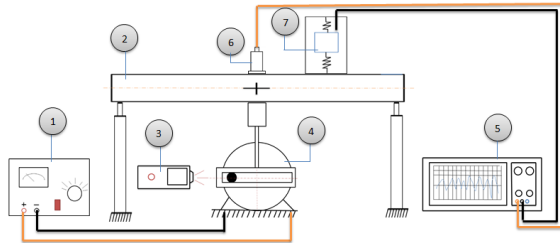




Gambar 3.12 Diagram Alir Sistematika Eksperimen

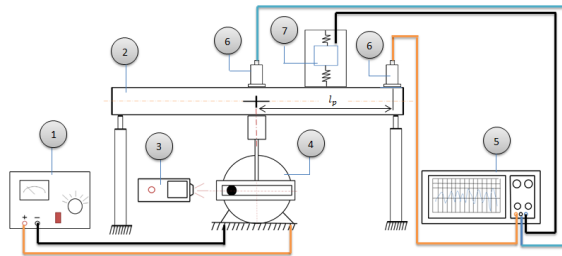
### 3.2.7 Skema Pengujian

Gambar 3.13 merupakan skema pengujian untuk gerak translasi. Pada pengujian ini, *probe* yang terhubung dengan *oscilloscope* diletakkan tepat di titik tengah sistem utama.



Gambar 3.13 Skema Pengujian Gerak Translasi (Syahir, 2018)

Pengujian kedua terlihat pada gambar 3.14 di bawah. Pengujian ini merupakan pengujian untuk gerak rotasi dengan menggunakan dua buah probe dengan posisi probe pertama diletakkan di titik tengah sistem utama dan *probe* lainnya diletakkan di bagian tepi sistem utama dengan jarak  $lp$ . Namun, untuk peralatan yang digunakan pada pengujian ini tetap sama dengan pengujian sebelumnya.



Gambar 3.14 Skema Pengujian Gerak Translasi dan Pitching (Syahir, 2018)

Keterangan (untuk gambar 3.13 dan 3.14):

- |                    |                 |
|--------------------|-----------------|
| 1. Power supply    | 5. Oscilloscope |
| 2. Sistem utama    | 6. Probe        |
| 3. Tachometer      | 7. EMVA         |
| 4. Motor penggerak |                 |

### 3.2.8 Pengambilan Data Eksperimen

Eksperimen pada penelitian ini dilakukan secara 2 tahap, yaitu eksperimen pada sistem utama tanpa EMVA dan sistem utama dengan EMVA. Eksperimen pada sistem utama tanpa EMVA dilakukan untuk mengetahui besar frekuensi natural sistem utama dan untuk menentukan amplitudo yang nantinya akan menjadi variasi untuk eksperimen pada sistem utama dengan EMVA. Sedangkan, eksperimen dilakukan pada sistem utama dengan EMVA bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi dari jumlah lilitan kawat pada kumparan EMVA, diameter kawat kumparan dan besar amplitudo sesuai dengan frekuensi naturalnya terhadap respon reduksi getaran serta energi listrik yang dihasilkan oleh EMVA.

Respon reduksi getaran dari sistem utama dengan EMVA dapat diketahui dari pembacaan hasil osilasi sistem pada *oscilloscope* yang dihungkan dengan ujung kumparan EMVA. Hasil dari eksperimen dituliskan pada tabel 3.4 berikut ini.

Tabel 3.4 Hasil Eksperimen

Amplitudo Eksitasi (m)	Lilitan	Posisi	Tanpa EMVA		Dengan EMVA			Reduksi	
			Translasi (m/s <sup>2</sup> )	Pitching (rad/s <sup>2</sup> )	Translasi (m/s <sup>2</sup> )	Pitching (rad/s <sup>2</sup> )	Voltase (volt)	Translasi	Pitching

3.2.9 Analisa Data dan Pembahasan

Setelah mendapatkan data hasil eksperimen, selanjutnya dilakukan analisa data dan pembahasan data hasil eksperimen sesuai dengan teori-teori yang digunakan. Dari analisa data dan pembahasan yang dilakukan, dapat diketahui pengaruh variabel-variabel yang mempengaruhi keluaran yang diharapkan yaitu respon reduksi getaran dan energi listrik.

### **3.2.10 Kesimpulan**

Dari hasil eksperimen yang didapatkan dan telah dilakukan pembahasan, maka dapat ditarik kesimpulan mengenai penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan yang ditulis merupakan inti pembahasan dan menjawab rumusan masalah yang telah dituliskan pada Bab 1 sehingga tujuan dari penelitian dapat tercapai.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Peralatan dan Instalasi Eksperimen

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen. Peralatan dalam eksperimen ini meliputi sistem utama, sistem *absorber*, dan peralatan penunjang lainnya seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1 berikut.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



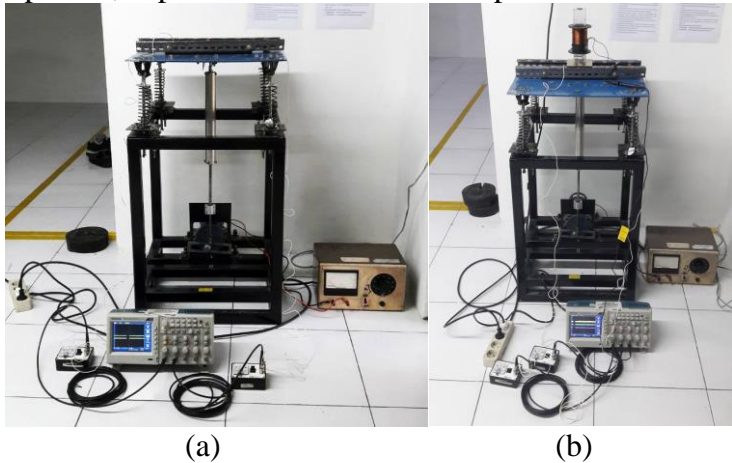


(g)

Gambar 4.1 Peralatan Penunjang Eksperimen  
 (a) *Power Supply*; (b) *Tachometer*; (c) *Probe*  
*Accelerometer*; (d) *Probe Voltmeter*; (e) Kabel  
 Penghubung; (f) *Oscilloscope*; (g) *Adaptor*

Dalam eksperimen ini diperlukan *power supply* yang berfungsi sebagai sumber energi listrik dari motor untuk menggerakkan sistem utama. *Tachometer* berfungsi untuk membaca kecepatan angular motor dalam satuan *radian per minute* (rpm). *Probe accelerometer* berfungsi sebagai sensor pendeteksi respon percepatan sistem utama yang dihubungkan dengan adaptor sebagai *supply* daya sensor pendeteksi. Dalam eksperimen ini dibutuhkan *probe accelerometer* sebanyak 2 buah untuk 2 buah adaptor. Sedangkan, adaptor dihubungkan dengan *oscilloscope* menggunakan kabel penghubung. Dalam eksperimen ini, dibutuhkan 2 buah kabel penghubung. *Probe voltmeter* berfungsi sebagai sensor pendeteksi respon tegangan yang dihasilkan oleh EMVA. Dalam eksperimen ini dibutuhkan *probe voltmeter* sebanyak 1 buah dan dihubungkan langsung ke *channel oscilloscope*. *Oscilloscope* adalah suatu alat yang berfungsi untuk menampilkan dan merekam data hasil pembacaan menggunakan *probe*.

Setelah kelengkapan alat penunjang eksperimen terpenuhi, dapat dilakukan instalasi eksperimen.



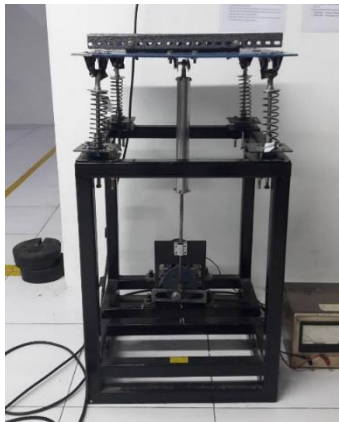
Gambar 4.2 Instalasi Eksperimen Sistem Utama (a)tanpa EMVA; (b)dengan EMVA

Gambar 4.2(a) menunjukkan instalasi eksperimen yang dilakukan untuk pengambilan data pada sistem utama tanpa penambahan EMVA. *Power supply* dihubungkan dengan motor untuk menggerakkan sistem utama. *Probe accelerometer* diletakkan di atas plat *exciter* untuk mendeteksi respon getaran yang terbaca di *oscilloscope*. *Oscilloscope* dihubungkan dengan adaptor yang juga terhubung dengan *probe accelerometer*. Sedangkan gambar 4.2(b) menunjukkan instalasi eksperimen untuk pengambilan data dengan penambahan EMVA pada sistem utama. Mekanisme EMVA yang diletakkan di atas plat *exciter* sesuai variasi posisi peletakan dihubungkan ke *oscilloscope* menggunakan *probe voltmeter* untuk mendeteksi respon energi

bangkitan yang dihasilkan oleh sistem utama dengan penambahan EMVA.

#### 4.1.1 Sistem Utama

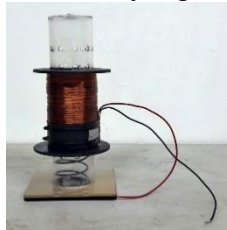
Sistem utama yang digunakan dalam penelitian ini merupakan suatu alat simulator getaran dengan dimensi  $50 \times 50 \times 96 \text{ [cm}^3\text{]}$ . Alat simulator getaran terdiri dari motor, poros penggerak, dan plat *exciter* yang ditopang dengan empat buah pegas. Plat *exciter* merupakan suatu plat aluminium dengan dimensi  $50 \times 50 \times 96 \text{ [cm}^3\text{]}$ . Empat buah pegas penopang yang digunakan memiliki 2 nilai kekakuan berbeda antara sisi kanan dan kiri agar sistem utama mampu menghasilkan gerak translasi dan *pitching*. Sistem utama untuk eksperimen ini ditunjukkan pada gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.3 Sistem Utama

#### 4.1.2 Sistem Absorber (*Electromagnetic Vibration Absorber*)

Penelitian dengan metode eksperimen menggunakan EMVA (*electromagnetic vibration absorber*) untuk mereduksi getaran berlebih dan merubah getaran tersebut menjadi energi listrik. Gambar 4.4 berikut ini merupakan rangkaian EMVA yang telah dirancang.



Gambar 4.4 *Electromagnetic Vibration Absorber* (EMVA)

Pada gambar 4.4 di atas, terlihat bahwa EMVA terdiri dari beberapa komponen yaitu tabung dan alas yang terbuat dari akrilik, magnet dan lempeng baja sebagai massa *absorber*, sebuah pegas dengan kekakuan 580 N/m, kumparan dari kawat tembaga berukuran 0,25 mm, serta dilengkapi dengan 4 buah baut dan mur untuk menyatukan EMVA dengan sistem utama. Komponen-komponen EMVA tersebut ditunjukkan pada gambar 4.5 berikut.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.5 Komponen-komponen EMVA (a)Pegas dan Alas; (b)Tabung dan Kumparan; (c)Magnet dan Lempeng Baja; (d)Baut dan Mur

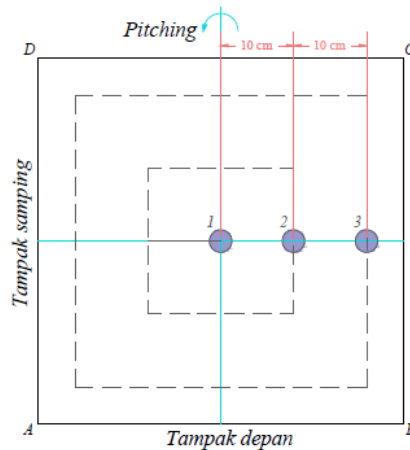
Pegas *absorber* terbuat dari kawat baja berukuran 2 mm. Pegas *absorber* memiliki 6,5 lilitan dengan diameter relatif pegas sebesar 38 mm dan tingginya sebesar 75 mm. Massa *absorber* telah dirancang sebesar 0,34 kg, terdiri dari magnet dan lempeng baja dengan spesifikasi massa *absorber* yang dituliskan pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Spesifikasi Massa *Absorber* (EMVA)

Magnet <i>Neodymium</i>	
Diameter (mm)	40
Tebal (mm)	40
Massa (kg)	0,30
Lempeng Baja	
Diameter (mm)	45
Tebal (mm)	3
Massa (kg)	0,04

EMVA hanya bergerak pada arah translasi. Penelitian pada sistem utama dengan penambahan EMVA dilakukan pada variasi amplitudo eksitasi 0,02 m, 0,03 m,

dan 0,04 m dengan variasi jumlah lilitan 1300, 2600 dan 3500 untuk mengetahui tegangan yang dihasilkan secara optimum. Penelitian dilakukan dengan variasi peletakan pada posisi 1, 2 dan 3. Posisi 1 merupakan posisi dengan jarak 0 cm, posisi 2 dengan jarak 10 cm, dan posisi 3 dengan jarak 20 cm dari titik pusat arah translasi. Skema variasi posisi peletakan EMVA ditunjukkan pada gambar 4.6 di bawah ini.



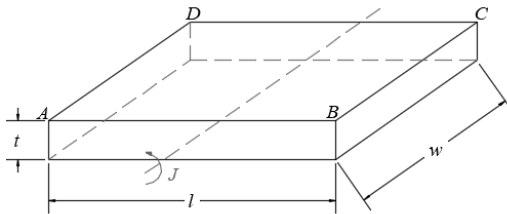
Gambar 4.6 Posisi Peletakan EMVA pada Plat Exciter

## 4.2 Analisa Perhitungan

Sistem utama ditopang dengan empat buah pegas dengan 2 macam nilai kekakuan pegas untuk sisi kanan dan kiri. Hal tersebut menyebabkan sistem utama bergerak dalam arah translasi dan *pitching*. Getaran dalam eksperimen ini ditinjau secara vertikal, dimana gerakan translasi dan *pitching* memiliki dimensi yang berbeda.

#### 4.2.1 Momen Inersia

Gerakan *pitching* termasuk gerakan rotasi yang ditinjau dalam arah  $\theta$ . Adanya gerakan translasi dan *pitching* menyebabkan plat *exciter* memiliki momen inersia. Momen inersia plat *exciter* ditunjukkan oleh gambar 4.7.



Gambar 4.7 Momen Inersia Plat *Exciter*

Nilai momen inersia dari plat *exciter* akibat gerakan pada arah *pitching* didapatkan berdasarkan analisa perhitungan menggunakan persamaan 4.1 berikut.

$$J = \frac{1}{12} m(l^2 + t^2) \quad (4.1)$$

Jika diketahui data plat *exciter* sebagai berikut,

Massa ( $m$ )	= 5,9 kg
Panjang ( $l$ )	= 0,55 m
Lebar ( $w$ )	= 0,55 m
Tebal ( $t$ )	= 0,006 m

maka,

$$J = \frac{1}{12} \times 5,9 \times (0,55^2 + 0,006^2) = 0,1487 \text{ kgm}^2$$

#### 4.2.2 Konstanta Pegas Absorber

Eksperimen dalam penelitian ini bertujuan untuk mereduksi getaran berlebih pada sistem utama menggunakan sistem *absorber* berupa EMVA. Berdasarkan teori *vibration absorber*, massa dan nilai kekakuan sistem *absorber* adalah sebesar 1:20 dari sistem utama. Pegas *absorber* didapatkan dengan memesan pada toko pembuat pegas sesuai spesifikasi yang telah dirancang pada bab 3. Selanjutnya, dapat dilakukan pengujian ulang untuk mendapatkan nilai kekakuan pegas secara aktualnya dengan menggunakan hukum Hooke. Hukum Hooke menjelaskan bahwa besar gaya yang bekerja ( $F$ ) sebanding dengan nilai kekakuan benda ( $k$ ) dan pertambahan panjang benda ( $\Delta x$ ) tersebut. Secara matematis, hukum Hooke dituliskan pada persamaan 4.2 berikut.

$$F = k \times \Delta x \quad (4.2)$$

Dengan diketahui data pengujian pegas EMVA sebagai berikut:

Panjang awal pegas ( $x_1$ )	= 0,0750 m
Panjang awal pegas ( $x_2$ )	= 7,5338 m
Massa beban ( $m$ )	= 2 kg

Maka dengan menggunakan hukum Hooke,

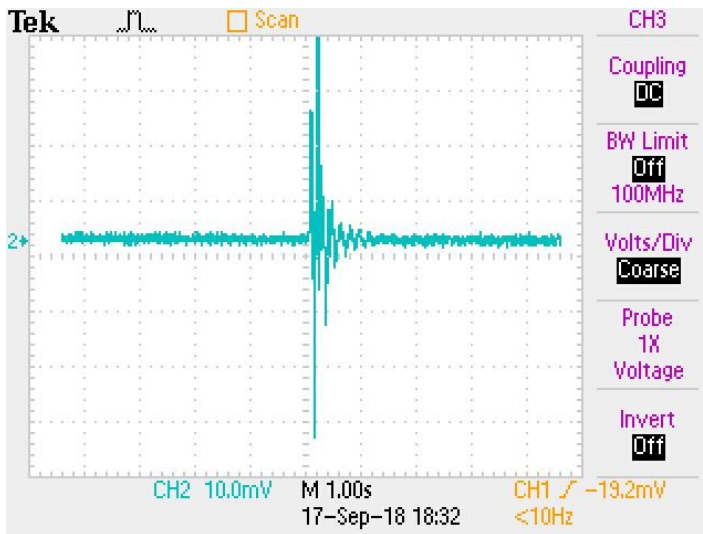
$$F = k \times \Delta x \quad \text{atau} \quad k = \frac{F}{\Delta x}$$

$$k = \frac{2 \times 9,81}{(7,5338 - 0,0750)} = 580,4733 \text{ N/m}$$



### 4.2.3 Konstanta Redaman Pegas Absorber

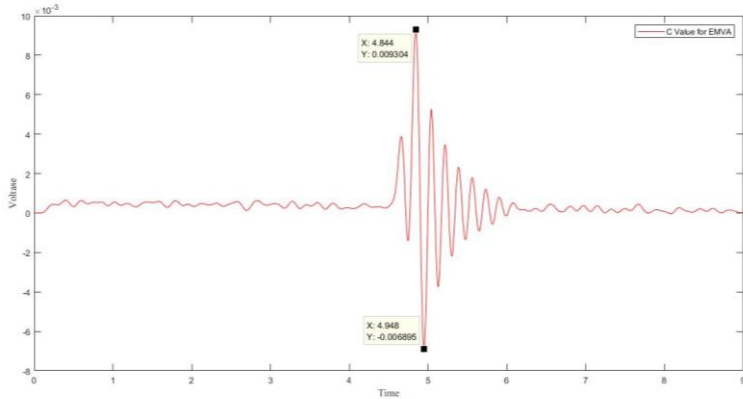
Perhitungan selanjutnya yang dilakukan adalah menghitung nilai konstanta redaman pegas. Sebelum melakukan perhitungan, dilakukan pengujian menggunakan *probe accelerometer* yang dihubungkan dengan *oscilloscope* untuk mengetahui respon getarannya. Pengujian redaman pegas untuk pegas *absorber* (EMVA) dilakukan dengan pembebanan sebesar 2 kg. Gambar 4.8 berikut merupakan hasil dari pengujian redaman pegas EMVA yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 4.8 Hasil Pengujian Redaman Pegas EMVA

Hasil respon getaran berupa penurunan logaritmik yang terbaca oleh *oscilloscope*, kemudian dilakukan *filtering* dan *smoothing* dengan menggunakan Simulink MATLAB untuk menghilangkan *noise* getaran yang

terjadi selama pengambilan data. Hasil dari *filtering* dan *smoothing* ditunjukkan oleh gambar 4.9 berikut.



Gambar 4.9 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Pengujian Redaman EMVA

Dari hasil *filtering* dan *smoothing* dapat dilanjutkan dengan perhitungan menggunakan persamaan *incremental degreement*, jika diketahui

$$\begin{aligned}\text{Massa beban } (m) &= 0,34 \text{ kg} \\ \text{Nilai kekakuan pegas } (k) &= 580,4733 \text{ N/m}\end{aligned}$$

Maka analisa perhitungan untuk nilai redaman pegas EMVA sebagai berikut.

- a. Rata-rata amplitudo puncak pertama

$$x_1 = \frac{0,009304 + (-0,006895)}{2} = 0,001205 \text{ m}$$

- b. Rata-rata amplitudo puncak terdekat

$$x_{n+1} = \frac{0,005263 + (-0,003683)}{2} = 0,00790 \text{ m}$$

c. Nilai redaman pegas EMVA

$$\begin{aligned}
 c &= 2m \sqrt{\frac{k}{m} \frac{1}{\left[ \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{x_1}{x_{n+1}}\right)} \right]^2 + 1}} \\
 &= 2(0,34) \sqrt{\frac{580,4733}{0,34}} \times \left( \frac{1}{\left[ \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{0,001205}{0,00790}\right)} \right]^2 + 1} \right) \\
 c &= 1,767 \text{ Ns/m}
 \end{aligned}$$

Dari analisa perhitungan di atas, diperoleh nilai redaman pegas EMVA menggunakan *incremental degreement* sebesar 1,767 Ns/m. Nilai aktual parameter penelitian hasil pengujian dituliskan pada tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Parameter Penelitian Aktual Hasil Pengujian

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa sistem utama	$m_1$	6,7	$kg$
Inersia massa utama	$J$	0,1487	$kgm^2$
Konstanta pegas A	$k_A$	3300	$N/m$
Konstanta pegas B	$k_B$	2500	$N/m$
Konstanta pegas C	$k_C$	3300	$N/m$
Konstanta pegas D	$k_D$	2500	$N/m$
Konstanta redaman A	$c_A$	74,035	$Ns/m$

Konstanta redaman B	$c_B$	33,827	$Ns/m$
Konstanta redaman C	$c_C$	33,827	$Ns/m$
Konstanta redaman D	$c_D$	74,035	$Ns/m$
Konstanta pegas penggerak	$k_0$	146	$N/m$
Konstanta redaman penggerak	$c_0$	1,3757	$Ns/m$
Massa <i>absorber</i> (EMVA)	$m_e$	0,34	$kg$
Konstanta pegas EMVA	$k_e$	580,473	$N/m$
Konstanta redaman EMVA	$c_e$	1,767	$Ns/m$

#### 4.2.4 Frekuensi Natural Sistem

Eksperimen dalam penelitian ini dilakukan pada frekuensi operasi 40,6941 rad/s (setara dengan 6,4448 Hz). Eksperimen dilakukan dalam kondisi resonansi, dimana besar frekuensi operasi yang digunakan sama dengan frekuensi natural dari sistem tersebut. Frekuensi natural sistem utama dengan EMVA didapatkan dari perhitungan determinan matriks yang telah disusun dari persamaan gerak pada bab 3. Berikut ini analisa perhitungan untuk mengetahui nilai frekuensi natural dari sistem utama dengan EMVA.

$$\det \begin{bmatrix} 12025,4285 + 6,7\omega^2 & -571,4285 & -(440 - 571,4285a) \\ -571,4285 & 571,4285 + 0,34\omega^2 & -571,4285a \\ -(440 - 571,4285a) & -571,4285a & (877,25 + 571,4285a^2) + \omega^2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Dengan nilai  $a = 0 \text{ m}$ , didapatkan:

$$\omega_{n1} = 36,8817 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{n2} = 46,1472 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{n3} = 76,7147 \text{ rad/s}$$

Dengan menggunakan cara yang sama seperti perhitungan di atas, untuk nilai  $a = 0,1 \text{ m}$  didapatkan nilai frekuensi natural sebagai berikut:

$$\omega_{n1} = 36,6697 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{n2} = 46,1434 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{n3} = 77,0683 \text{ rad/s}$$

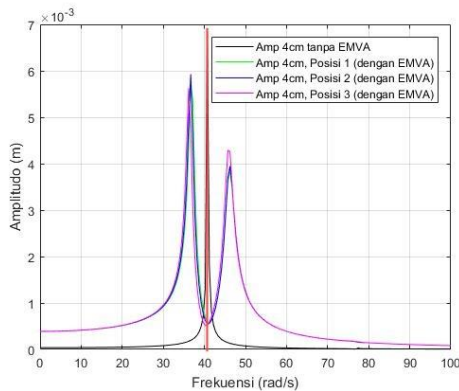
Dan untuk nilai  $a = 0,2 \text{ m}$ , didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\omega_{n1} = 36,2862 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{n2} = 45,9560 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{n3} = 78,1028 \text{ rad/s}$$

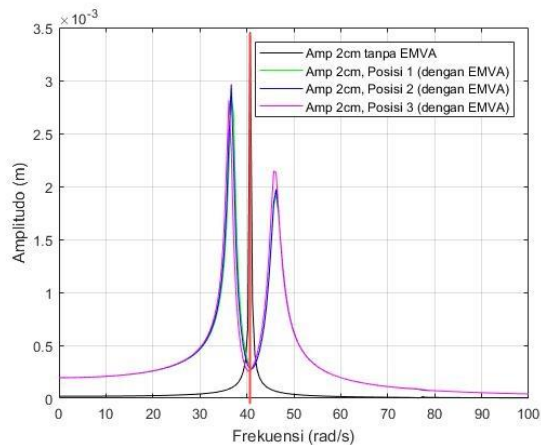
Dengan menggunakan *software* Simulink MATLAB, diperoleh *bodediagram* seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



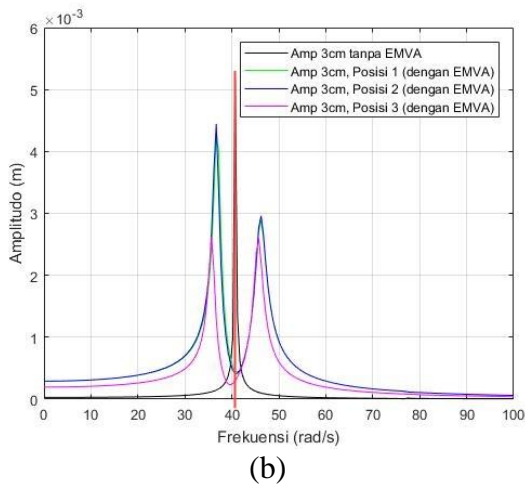
Gambar 4.10 *Bodediagram* Sistem Utama tanpa EMVA dan dengan EMVA Variasi Amplitudo Eksitasi 0,04 m

Dari gambar 4.10 di atas terlihat bahwa grafik warna berwarna hitam merupakan sistem utama tanpa

menggunakan penambahan EMVA. Grafik berwarna hijau merupakan sistem utama dengan penambahan EMVA yang diletakkan pada posisi 1, grafik berwarna biru merupakan sistem utama dengan penambahan EMVA yang diletakkan pada posisi 2, dan grafik berwarna magenta merupakan sistem utama dengan penambahan EMVA yang diletakkan pada posisi 3. Dengan penambahan EMVA pada sistem utama, terlihat bahwa frekuensi natural dari sistem bergeser ke kiri dari semula, dimana semakin diletakkan di dekat pegas dengan nilai kekakuan yang lebih kecil, maka frekuensi natural pertama semakin bergeser ke kiri menjauhi frekuensi natural pertama dari sistem utama tanpa EMVA. Hal yang sama juga terlihat pada *bodediagram* menggunakan variasi amplitudo 2cm dan 3cm yang ditunjukkan pada gambar 4.11 berikut ini.



(a)



Gambar 4.11 *Bodediagram* Sistem Utama tanpa EMVA dan dengan EMVA Variasi Amplitudo (a)0,02m; (b)0,03m

### 4.3 Analisa Eksperimen

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan metode eksperimen. Eksperimen dilakukan untuk mereduksi getaran pada sistem utama dan mengetahui energi bangkitan berupa energi listrik yang dihasilkan oleh sistem *absorber*. Sistem *absorber* yang digunakan adalah *Electromagnetic Vibration Absorber* (EMVA). Oleh karena itu, analisa eksperimen dilakukan pada sistem utama tanpa EMVA dan sistem utama dengan penambahan EMVA. Pergerakan sistem dalam eksperimen ini ditinjau pada arah translasi vertikal dan *pitching*. Variasi input yang diberikan dalam eksperimen ini berupa amplitudo eksitasi, jumlah lilitan, dan posisi peletakan EMVA.

Respon getaran yang diinginkan dalam eksperimen ini berupa respon percepatan translasi dan *pitching*. Namun, hasil eksperimen yang terbaca pada *oscilloscope* berupa data *time* dan *voltase*. Sehingga, data hasil eksperimen tersebut harus dikonversi menjadi respon percepatan dengan menggunakan persamaan (4.4) dan (4.5) berdasarkan penelitian sebelumnya (Mahardika, 2018). Persamaan (4.4) berikut digunakan untuk mengkonversi data hasil eksperimen arah translasi menjadi respon percepatan *linear*.

$$\ddot{x} = \frac{G}{V} g \quad (4.3)$$

Keterangan:

- $\ddot{x}$  : Respon percepatan *linear* (m/s<sup>2</sup>)
- $G$  : Data yang akan diolah dikalikan skala pembacaan *oscilloscope* (Volt)
- $V$  : Sensitivitas *accelerometer* (Volt)
- $g$  : percepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

Sedangkan, untuk mengkonversi data hasil eksperimen arah *pitching* menjadi respon percepatan *angular* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (4.4) berikut.

$$\ddot{\theta} = \frac{\ddot{x}_R - \ddot{x}_T}{l_{TR}} \quad (4.4)$$

Keterangan:

- $\ddot{\theta}$  : Respon percepatan angular (rad/s<sup>2</sup>)
- $\ddot{x}_T$  : Respon percepatan linear dari gerak translasi (m/s<sup>2</sup>)
- $\ddot{x}_R$  : Respon percepatan linear dari gerak rotasi (rad/s<sup>2</sup>)
- $l_{TR}$  : jarak peletakan *probe* translasi dan rotasi (m)



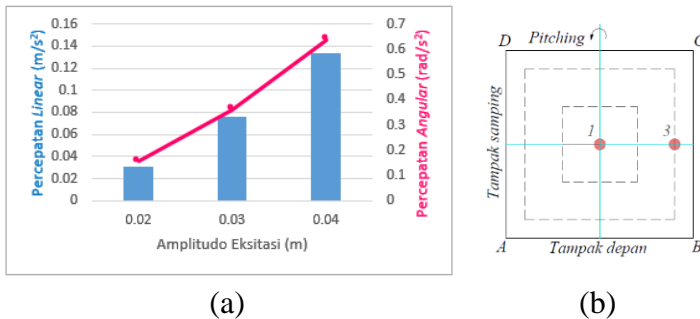
Selanjutnya, dapat dilakukan *filtering* dan *smoothing* menggunakan Simulink MATLAB terhadap data hasil konversi untuk menghilangkan *noise* yang terjadi selama pengujian. Dari hasil *filtering* dan *smoothing* dapat diketahui nilai RMS (*root mean square*) untuk masing-masing variasi pengujian dalam arah translasi dan *pitching*. Sehingga, bisa didapatkan reduksi respon getaran dalam bentuk persen dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Reduksi} = \frac{RMS_1 - RMS_2}{RMS_1} \times 100\% \quad (4.5)$$

Dimana  $RMS_1$  adalah nilai respon getaran sistem utama tanpa EMVA dan  $RMS_2$  untuk nilai respon getaran sistem utama dengan EMVA.

#### 4.3.1 Analisa Eksperimen Sistem Utama tanpa EMVA

Eksperimen untuk sistem utama tanpa EMVA dilakukan pada amplitudo eksitasi 0,02 m, 0,03 m, dan 0,04 m dengan frekuensi operasi yang terbaca oleh *tachometer* sebesar 386,7 rpm setara dengan 40,6941 rad/s atau 6,4448 Hz. Pada eksperimen sistem utama tanpa EMVA, pengujian dilakukan dengan menggunakan 2 buah *probe accelerometer*, *probe* 1 yang diletakkan pada posisi 1 untuk mendeteksi respon getaran arah translasi dan *probe* 2 pada posisi 3 untuk mendeteksi respon getaran arah *pitching*. Skema peletakan *probe* ditunjukkan pada gambar 4.12(b) dengan grafik hasil eksperimen berupa RMS percepatan *linear* dan *angular* pada gambar 4.12(a).



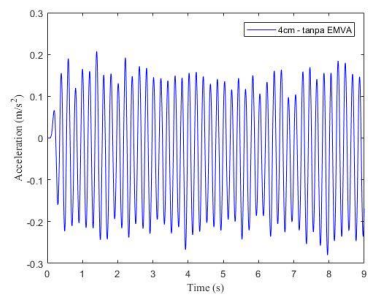
Gambar 4.12 (a) Grafik RMS 2 DOF Sistem Utama tanpa EMVA; (b) Posisi Peletakan *Probe* pada Plat *Exciter*

Gambar 4.12(a) di atas menunjukkan bahwa respon getaran dengan nilai percepatan *linear* maupun *angular* tertinggi terjadi ketika amplitudo eksitasi 0,04 m. Nilai RMS tertinggi sebesar 0,1340 m/s<sup>2</sup> untuk translasi dan 0,6387 rad/s<sup>2</sup> untuk *pitching*. *Trendline* grafik di atas menunjukkan bahwa semakin tinggi amplitudo eksitasi, maka respon amplitudonya semakin tinggi. Sehingga, dengan amplitudo tinggi, percepatan sistem akan semakin tinggi dengan getaran yang tinggi.

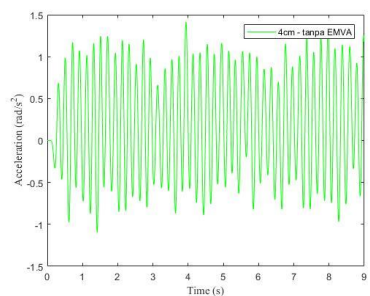
Sistem utama memiliki nilai RMS untuk *pitching* lebih tinggi dibandingkan dengan nilai RMS untuk translasi pada setiap amplitudo eksitasi. Hal ini dikarenakan nilai kekakuan pegas A dan D lebih besar dibandingkan dengan pegas B dan C. Sehingga dapat dikatakan bahwa pegas A dan D lebih kaku daripada pegas B dan C. Dengan demikian, dari tampak depan terlihat adanya sudut perpindahan yang dialami plat *exciter* akibat getaran arah *pitching*. Tabel 4.3 berikut menunjukkan nilai RMS hasil eksperimen sistem utama tanpa EMVA.

Tabel 4.3 Nilai RMS Hasil Eksperimen Sistem Utama tanpa EMVA

Amplitudo (m)	Translasi ( $\text{m/s}^2$ )	<i>Pitching</i> ( $\text{rad/s}^2$ )
0,02	0,0306	0,1559
0,03	0,0757	0,3594
0,04	0,1340	0,6387



(a)



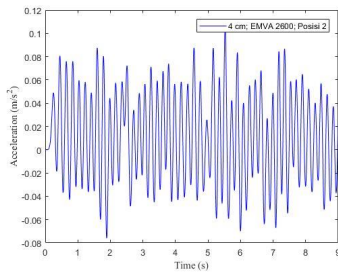
(b)

Gambar 4.13 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* tanpa EMVA (a)Translasi; (b)*Pitching*

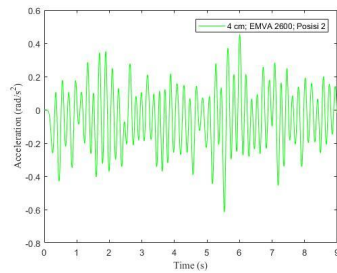
Gambar 4.13 di atas merupakan hasil *filtering* dan *smoothing* sistem utama tanpa penambahan EMVA pada variasi amplitudo 0,04 m menggunakan Simulink MATLAB. Hasil *filtering* dan *smoothing* menunjukkan bahwa sistem berosilasi dan respon getarannya berupa respon percepatan terhadap waktu.

#### **4.3.2 Analisa Eksperimen Sistem Utama dengan EMVA**

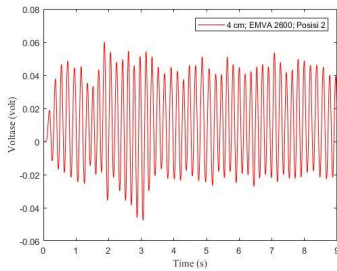
Eksperimen pada sistem utama dengan penambahan EMVA sebagai sistem *absorber* dilakukan dengan menggunakan 2 buah *probe accelerometer* untuk mendeteksi respon translasi dan *pitching* dan 1 buah *probe voltmeter* untuk mendeteksi energi listrik yang dapat dihasilkan oleh EMVA. Respon getaran yang dianalisa untuk arah translasi dan *pitching* adalah respon percepatan *linear* dan *angular* dari massa utama. Sehingga, *probe accelerometer* dipasang di plat *exciter* dengan skema posisi peletakan yang sama seperti ditunjukkan pada gambar 4.12(b) di atas. Analisa eksperimen pada sistem utama dengan EMVA dilakukan untuk masing-masing variasi *input* dalam penelitian ini.



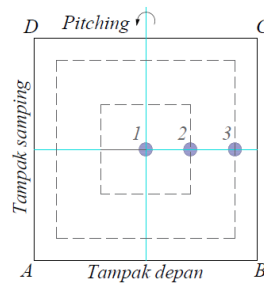
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.14 Hasil *Filtering* dan *Smoothing* dengan Penambahan EMVA (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase; (d)Posisi Peletakan EMVA

Gambar 4.14 di atas merupakan hasil data eksperimen yang telah dilakukan *filtering* dan *smoothing* menggunakan Simulink MATLAB pada amplitudo eksitasi 0,04 m dengan jumlah lilitan EMVA sebanyak 2600 pada posisi 2, dimana skema posisi peletakan EMVA seperti ditunjukkan pada gambar 4.14(d). Gambar 4.14(a) menunjukkan respon percepatan *linear* ( $\text{m/s}^2$ ) untuk

getaran arah translasi dan gambar 4.14(b) menunjukkan respon percepatan *angular* ( $\text{rad/s}^2$ ) untuk getaran arah *pitching*. Sedangkan gambar 4.14(c) menunjukkan data tegangan bangkitan (volt) yang dihasilkan oleh EMVA. Tabel 4.4 berikut ini menunjukkan data hasil eksperimen yang telah dilakukan dalam penelitian ini. Dari tabel berikut, dapat dilihat nilai respon getaran berupa percepatan *linear* untuk getaran translasi, percepatan *angular* untuk getaran arah *pitching*. Selain itu, dapat dilihat juga persentase reduksi getaran translasi dan *pitching* serta tegangan bangkitan yang dihasilkan dari eksperimen sistem utama dengan penambahan EMVA.

Tabel 4.4 Data Hasil Eksperimen

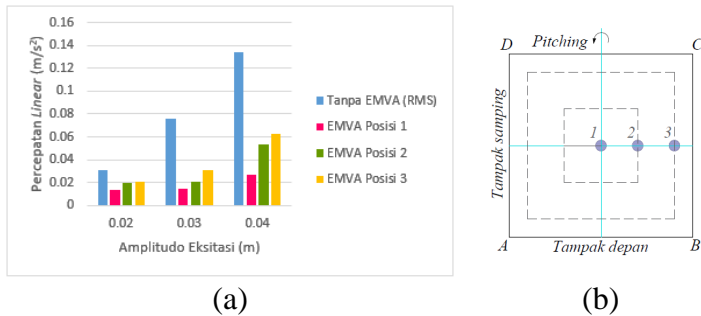
Amplitudo Eksitasi (m)	Lilitan	Posisi	Tanpa EMVA		Dengan EMVA			Reduksi	
			Translasi ( $\text{m/s}^2$ )	Pitching ( $\text{rad/s}^2$ )	Translasi ( $\text{m/s}^2$ )	Pitching ( $\text{rad/s}^2$ )	Voltage (volt)	Translasi	Pitching
0.02	1300	1	0.0306	0.1559	0.0136	0.1036	0.0178	55.56%	33.55%
		2			0.0197	0.1017	0.0147	35.62%	34.77%
		3			0.0209	0.0724	0.0072	31.70%	53.56%
	2600	1			0.0109	0.0788	0.0397	64.38%	49.45%
		2			0.0233	0.1226	0.0405	23.86%	21.36%
		3			0.0164	0.0559	0.0399	46.41%	64.14%
	3500	1			0.0201	0.1043	0.0260	34.31%	33.10%
		2			0.0238	0.1216	0.0362	22.22%	22.00%
		3			0.0159	0.0815	0.0155	48.04%	47.72%
	1	1			0.0150	0.1408	0.0185	80.18%	60.82%
		2			0.0210	0.1090	0.0232	72.26%	69.67%
		3			0.0308	0.0918	0.0334	59.31%	74.46%
0.03	1300	1	0.0757	0.3594	0.0209	0.1494	0.0288	72.39%	58.43%
		2			0.0303	0.1489	0.0294	59.97%	58.57%
		3			0.0335	0.1077	0.0331	55.75%	70.03%
	2600	1			0.0159	0.1100	0.0173	79.00%	69.39%
		2			0.0185	0.0972	0.0208	75.56%	72.95%
		3			0.0224	0.0853	0.0288	70.41%	76.27%
	3500	1			0.0267	0.2831	0.0212	80.07%	55.68%
		2			0.0534	0.2513	0.0224	60.15%	60.65%
		3			0.0630	0.1425	0.0240	52.99%	77.69%
	1	1			0.0350	0.2226	0.0256	73.88%	65.15%
		2			0.0388	0.1814	0.0266	71.04%	71.60%
		3			0.0487	0.1787	0.0363	63.66%	72.02%
0.04	1300	1	0.1340	0.6387	0.0414	0.2104	0.0227	69.10%	67.06%
		2			0.0476	0.2294	0.0229	64.48%	64.08%
		3			0.0358	0.1639	0.0219	73.28%	74.34%
	2600	1							
		2							
		3							
	3500	1							
		2							
		3							

#### **4.3.2.1 Analisa Variasi Amplitudo Eksitasi terhadap Percepatan *Linear* sebagai Respon Getaran Arah Translasi**

Variasi amplitudo eksitasi yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,02 m, 0,03 m, dan 0,04 m. dengan frekuensi operasi sebesar 40,6941 rad/s (6,4448 Hz). Pada sub bab ini akan dibahas mengenai analisa respon getaran sistem utama dengan penambahan EMVA untuk arah translasi. Respon getaran arah translasi berupa nilai RMS percepatan *linear* ( $\text{m/s}^2$ ). Penggunaan variasi amplitudo eksitasi yang tinggi dapat menghasilkan nilai percepatan *linear* yang tinggi pada sistem utama.

##### **4.3.2.1.1 Analisa Variasi Amplitudo Eksitasi terhadap Respon Percepatan *Linear* untuk Setiap Variasi Jumlah Lilitan Kumpanan EMVA**

Pada penelitian ini, telah dilakukan eksperimen dengan variasi amplitudo eksitasi untuk mengetahui respon getaran arah translasi berupa percepatan *linear*. Eksperimen dilakukan dengan penambahan EMVA pada sistem utama untuk setiap variasi jumlah lilitan kumpanan EMVA yang digunakan.



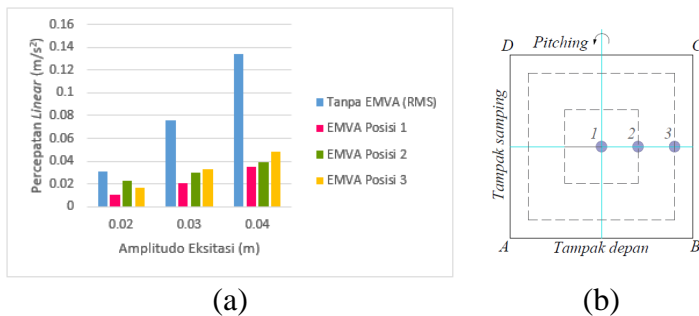
Gambar 4.15 (a)Grafik RMS Percepatan *Linear* Variasi Jumlah Lilitan 1300; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.15(a) di atas menunjukkan variasi amplitudo terhadap nilai percepatan *linear* sistem utama untuk jumlah lilitan kumparan 1300 pada setiap posisi peletakan EMVA sesuai dengan skemanya pada gambar 4.15(b). Pada grafik di atas terlihat bahwa nilai percepatan *linear* sistem utama tanpa EMVA tertinggi adalah ketika amplitudo eksitasi yang digunakan adalah 0,04 m. Nilai percepatan *linear* tertinggi didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 untuk sistem utama dengan penambahan EMVA pada posisi 3, nilainya sebesar  $0,0630 \text{ m/s}^2$ . Sedangkan nilai percepatan *linear* terendah didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,02 m untuk sistem utama dengan penambahan EMVA pada posisi 1, nilainya sebesar  $0,0136 \text{ m/s}^2$ .

Nilai percepatan *linear* dari eksperimen sistem utama dengan EMVA variasi jumlah lilitan 1300 yang diletakkan pada posisi 1 menunjukkan nilai yang semakin tinggi ketika menggunakan amplitudo eksitasi yang



semakin tinggi. Hal yang sama juga terlihat pada *trendline* hasil eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 1300 yang diletakkan pada posisi 2 dan 3. Hal ini sesuai dengan hasil perhitungan menggunakan teori *dynamic vibration absorber*, dan hasilnya juga ditunjukkan oleh *bode diagram* yang telah dibuat menggunakan *software* Simulink MATLAB.

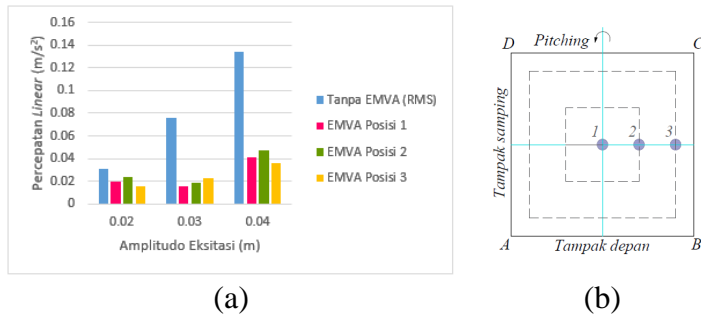


Gambar 4.16 (a)Grafik RMS Percepatan Linear Variasi Jumlah Lilitan 2600; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat Exciter

Gambar 4.16(a) di atas menunjukkan grafik hubungan variasi amplitudo eksitasi terhadap nilai percepatan *linear* sistem utama untuk jumlah lilitan kumparan 2600 pada setiap posisi peletakan EMVA pada plat *exciter* sesuai dengan skemanya pada gambar 4.16(b). Pada gambar 4.16(a) di atas terlihat bahwa sistem utama tanpa penambahan EMVA ketika amplitudo eksitasi 0,04 m menghasilkan nilai percepatan *linear* tertinggi dibandingkan eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,02 m dan 0,03 m dalam eksperimen. Nilai percepatan *linear* tertinggi untuk sistem utama dengan

penambahan EMVA adalah sebesar  $0,0487 \text{ m/s}^2$  yang didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi  $0,04 \text{ m}$ , dimana EMVA diletakkan pada posisi 3. Nilai percepatan *linear* terendah yang dihasilkan sistem utama dengan penambahan EMVA adalah  $0,0109 \text{ m/s}^2$ , ketika eksperimen menggunakan variasi amplitudo eksitasi  $0,02 \text{ m}$  dan EMVA diletakkan pada posisi 1.

Pada grafik di atas terlihat bahwa nilai percepatan *linear* dari eksperimen sistem utama dengan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 1 menunjukkan nilai yang semakin tinggi ketika menggunakan amplitudo eksitasi. Hal yang sama juga terlihat pada *trendline* hasil eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 2 dan 3. Hal ini sesuai dengan hasil perhitungan menggunakan teori *dynamic vibration absorber*, dan hasilnya juga ditunjukkan oleh *bode diagram* yang telah dibuat menggunakan *software* Simulink MATLAB. *Bode diagram* tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi amplitudo eksitasi yang digunakan, maka puncak respon amplitudonya akan semakin tinggi.



Gambar 4.17 (a) Grafik RMS Percepatan *Linear* Variasi Jumlah Lilitan 3500; (b) Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.17(a) merupakan grafik hubungan amplitudo eksitasi terhadap respon getaran arah translasi berupa percepatan *linear* dengan variasi amplitudo 3500 pada setiap variasi posisi peletakan EMVA sesuai dengan skemanya pada gambar 4.17(b). Percepatan *linier* tertinggi yang dihasilkan dari eksperimen tanpa dan dengan penambahan EMVA adalah ketika menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 m. Nilai percepatan *linear* tertinggi tanpa penambahan EMVA adalah  $0,1340 \text{ m/s}^2$ . Sedangkan nilai percepatan *linear* tertinggi untuk sistem utama dengan penambahan EMVA sebesar  $0,0476 \text{ m/s}^2$ . Nilai tersebut didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 m, dimana EMVA diletakkan pada posisi 2. Eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,02 m dengan penambahan EMVA pada posisi 3 menghasilkan nilai percepatan *linear* yang sama dengan eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,03 m dengan penambahan EMVA pada posisi 1. Nilai tersebut merupakan nilai percepatan *linear* terendah pada

eksperimen dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 3500. Nilai percepatan *linear* pada eksperimen tersebut sebesar  $0,0159 \text{ m/s}^2$ .

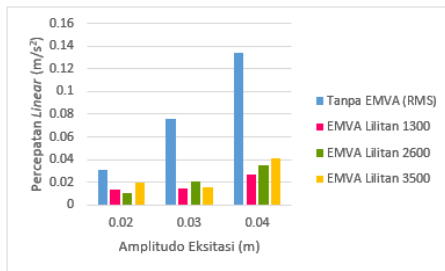
*Trendline* hasil eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 3500 yang diletakkan pada posisi 1 dan 2 tidak sesuai dengan hasil perhitungan menggunakan teori *dynamic vibration absorber*, bahwa respon amplitudo sistem akan semakin tinggi apabila amplitudo eksitasi yang digunakan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan adanya kesalahan dalam pengambilan data, seperti pengambilan data dilakukan dalam kondisi yang belum stabil. Namun, *trendline* hasil eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 3500 sudah sesuai dengan hasil perhitungan menggunakan teori DVA.

Dari ketiga grafik di atas, dapat disimpulkan bahwa adanya penambahan EMVA dapat menurunkan nilai percepatan *linear* yang dihasilkan dari sistem utama. Dengan kata lain, penambahan EMVA dapat dilakukan untuk meredam getaran sistem utama. Getaran sistem utama dengan nilai RMS percepatan *linear* tinggi mengakibatkan magnet di dalam EMVA beresilasi dengan percepatan tinggi. Penambahan EMVA sangat dibutuhkan untuk meredam getaran dengan variasi amplitudo eksitasi  $0,04 \text{ m}$ . Hal ini dikarenakan sistem utama menghasilkan respon getaran berupa nilai RMS percepatan *linear* tertinggi dibandingkan menggunakan amplitudo eksitasi  $0,02 \text{ m}$  dan  $0,03 \text{ m}$ . Respon getaran translasi dengan nilai tinggi pada sistem utama dengan penambahan EMVA mengakibatkan magnet di dalam EMVA beresilasi dengan percepatan tinggi. Dari ketiga grafik di atas, didapatkan nilai RMS percepatan *linear* tertinggi sebesar  $0,0630 \text{ m/s}^2$  untuk eksperimen sistem utama dengan EMVA variasi

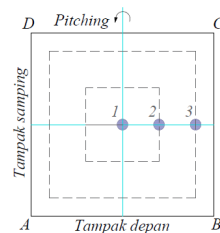
jumlah lilitan kumparan 1300 yang diletakkan pada posisi 3, eksperimen dilakukan menggunakan variasi amplitudo eksperimen 0,04 m. Sedangkan nilai RMS percepatan *linear* terendah sebesar  $0,0109 \text{ m/s}^2$  yang didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,02 dengan menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan 2600 dan diletakkan pada posisi 1.

#### 4.3.2.1.2 Analisa Variasi Amplitudo Eksitasi terhadap Respon Percepatan *Linear* pada Setiap Variasi Posisi Peletakan EMVA

Pada penelitian ini, dilakukan eksperimen sistem utama dengan penambahan EMVA yang memiliki jumlah lilitan kumparan yang bervariasi menggunakan variasi amplitudo eksitasi pada setiap variasi posisi peletakan EMVA. Eksperimen dilakukan untuk mengetahui respon getaran arah translasi berupa percepatan *linear* untuk setiap variasi dalam eksperimen.



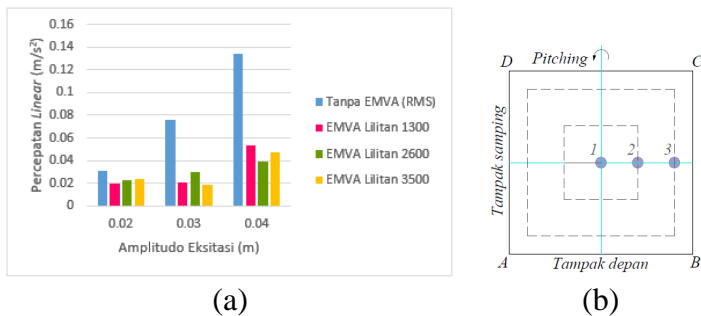
(a)



(b)

Gambar 4.18 (a)Grafik RMS Percepatan *Linear* Variasi Posisi 1; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

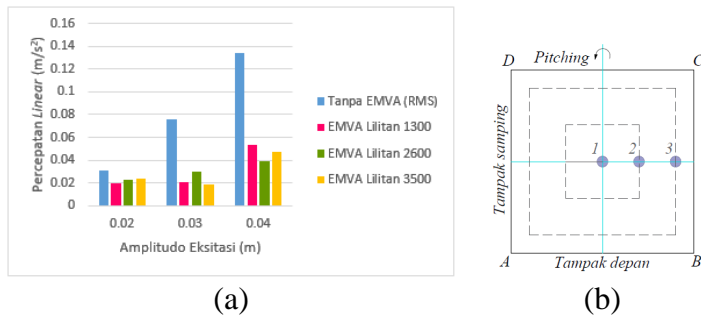
Gambar 4.18(a) menggambarkan grafik hubungan amplitudo eksitasi terhadap nilai percepatan *linear* yang dihasilkan dalam eksperimen untuk sistem utama tanpa EMVA dan dengan EMVA. EMVA diletakkan pada posisi 1 sesuai dengan skemanya seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.18(b) di atas. Percepatan *linear* tertinggi pada sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 3500 terlihat ketika eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 m, nilainya sebesar 0,0414 m/s<sup>2</sup>. Sedangkan percepatan terendah dihasilkan oleh sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 ketika menggunakan variasi amplitudo 0,02 m. Nilai percepatan *linear* terendah sebesar 0,0109 m/s<sup>2</sup>.



Gambar 4.19 (a)Grafik RMS Percepatan *Linear* Variasi Posisi 2; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.19(a) menggambarkan grafik hubungan amplitudo eksitasi yang digunakan dalam eksperimen terhadap nilai percepatan *linear* dari sistem utama untuk variasi peletakan EMVA pada posisi 2. Posisi peletakan EMVA sesuai dengan skema pada gambar

4.19(b). Dari grafik di atas, terlihat bahwa nilai percepatan *linear* tertinggi sebesar  $0,0534 \text{ m/s}^2$  yang dihasilkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi  $0,04 \text{ m}$  untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan 1300. Sedangkan nilai percepatan *linear* terendah sebesar  $0,0185 \text{ m/s}^2$  didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi  $0,03 \text{ m}$  dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan 3500.



Gambar 4.20 (a)Grafik RMS Percepatan *Linear* Variasi Posisi 3; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.20(b) menggambarkan grafik hubungan amplitudo eksitasi yang digunakan dalam eksperimen terhadap percepatan *linear* yang dihasilkan oleh sistem utama tanpa dan dengan penambahan EMVA untuk setiap variasi jumlah lilitan kumparan pada posisi 3. Skema posisi peletakan EMVA pada plat *exciter* ditunjukkan oleh gambar 4.20(b). Nilai percepatan *linear* tertinggi didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi  $0,04 \text{ m}$  untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan 1300, dimana

nilainya sebesar  $0,0630 \text{ m/s}^2$ . Sedangkan nilai percepatan *linear* terendah didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo  $0,03 \text{ m}$  untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan 3500, dimana nilainya sebesar  $0,0224 \text{ m/s}^2$ .

Ketiga grafik di atas menunjukkan bahwa penambahan EMVA mampu meredam getaran dari sistem utama. Hal ini terlihat dari nilai percepatan *linear* sistem utama dengan penambahan EMVA menjadi lebih rendah dibandingkan dengan nilai percepatan *linear* dari sistem utama tanpa penambahan EMVA. Dari ketiga grafik di atas, terlihat bahwa eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi  $0,04 \text{ m}$  mampu menghasilkan nilai percepatan *linear* lebih tinggi dibandingkan menggunakan variasi amplitudo eksitasi lainnya, yaitu  $0,02 \text{ m}$  dan  $0,03 \text{ m}$ .

Nilai percepatan *linear* tertinggi sebesar  $0,0630 \text{ m/s}^2$  didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi  $0,04 \text{ m}$  untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan 1300 yang diletakkan pada posisi 3. Sedangkan, nilai percepatan *linear* terendah sebesar  $0,0109 \text{ m/s}^2$  didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi  $0,02 \text{ m}$  untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan 2600 yang diletakkan di posisi 1. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa penambahan EMVA sangat dibutuhkan untuk meredam sistem utama dengan amplitudo eksitasi  $0,04 \text{ m}$ . Hal ini sesuai dengan teori DVA, yaitu amplitudo dengan nilai puncak yang sangat besar perlu penambahan peredam untuk mereduksi respon getaran yang dihasilkan dan menghilangkan efek resonansi. Puncak efek resonansi aslinya dihilangkan



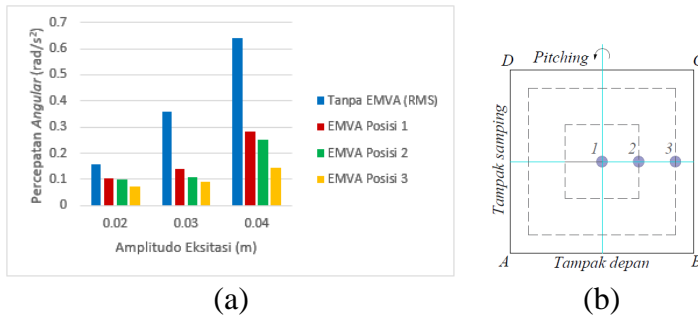
menjadi dua puncak baru seperti yang ditunjukkan pada *bode diagram* pada gambar 4.10 dan 4.11.

#### **4.3.2.2 Analisa Variasi Amplitudo Eksitasi terhadap Percepatan *Angular* sebagai Respon Getaran Arah *Pitching***

Pada penelitian ini, eksperimen dilakukan menggunakan sistem utama yang ditopang oleh empat buah pegas pada titik A, B, C, dan D dengan dua macam nilai kekakuan yang berbeda, yaitu  $k_A = k_D$  dan  $k_B = k_C$ , dimana  $k_A > k_B$ . Hal ini mengakibatkan massa utama mengalami getaran arah translasi dan pitching. Pada sub bab ini akan dibahas mengenai analisa respon getaran arah *pitching* berupa percepatan *angular* untuk eksperimen sistem utama dengan penambahan EMVA.

##### **4.3.2.2.1 Analisa Variasi Amplitudo Eksitasi terhadap Respon Percepatan *Angular* pada Setiap Variasi Posisi Peletakan EMVA**

Pada penelitian ini, telah dilakukan eksperimen menggunakan variasi amplitudo untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan pada setiap variasi posisi peletakan EMVA. Eksperimen dilakukan untuk mengetahui respon getaran arah pitching berupa percepatan angular (rad/s<sup>2</sup>). Berikut ini merupakan analisa nilai percepatan *angular* untuk setiap variasi jumlah lilitan EMVA yang digunakan dalam eksperimen.

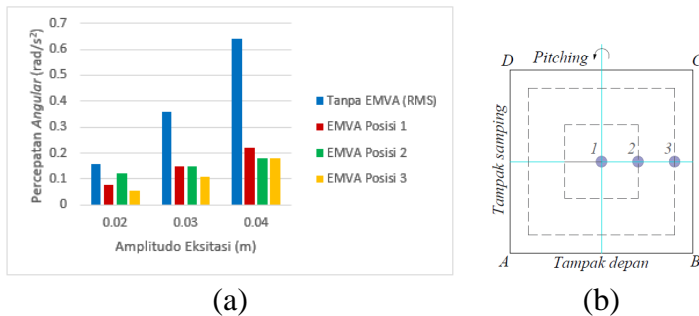


Gambar 4.21 (a)Grafik RMS Percepatan *Angular* Variasi Jumlah Lilitan 1300; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.21(a) menunjukkan grafik hubungan amplitudo eksitasi terhadap RMS dari nilai percepatan *angular* hasil eksperimen. Grafik tersebut juga menunjukkan perbandingan nilai percepatan *angular* sistem utama tanpa EMVA dan dengan EMVA untuk variasi jumlah lilitan 1300 yang diletakkan pada setiap variasi posisi. Skema posisi peletakan EMVA pada plat *exciter* ditunjukkan oleh gambar 4.21(b) di atas. Pada grafik di atas, terlihat bahwa nilai percepatan *angular* tertinggi adalah 0,2831 rad/s<sup>2</sup> untuk eksperimen sistem utama menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 m dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 1300 yang diletakkan pada posisi 1. Sedangkan nilai percepatan *angular* terendah adalah 0,0724 rad/s<sup>2</sup> untuk eksperimen sistem utama menggunakan amplitudo eksitasi 0,02 m dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 1300, dimana EMVA diletakkan pada posisi 3.

Nilai percepatan *angular* dari eksperimen sistem utama dengan EMVA variasi jumlah lilitan 1300

yang diletakkan pada posisi 1 menunjukkan nilai yang semakin tinggi ketika menggunakan amplitudo eksitasi yang digunakan semakin tinggi. Hal yang sama juga terlihat pada *trendline* percepatan *angular* hasil dari eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 1300 yang diletakkan pada posisi 2 dan 3. Hal ini sesuai dengan hasil perhitungan menggunakan teori *dynamic vibration absorber*. Hasil perhitungan tersebut juga ditunjukkan oleh *bode diagram* yang telah dibuat dengan menggunakan *software* Simulink MATLAB. Dari *bode diagram* tersebut terlihat bahwa nilai puncak dari respon amplitudo sistem semakin tinggi untuk amplitudo eksitasi yang semakin tinggi.

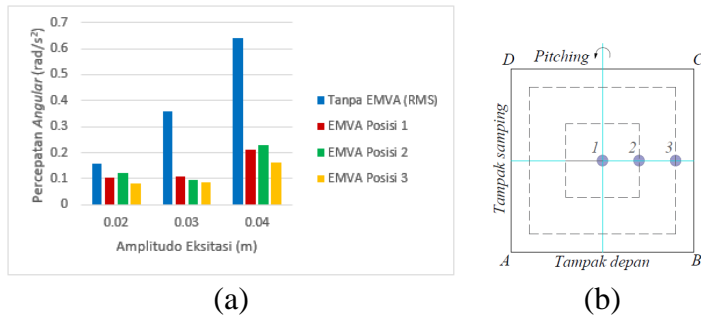


Gambar 4.22 (a)Grafik RMS Percepatan *Angular* Variasi Jumlah Lilitan 2600; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.22(a) di atas menunjukkan grafik hubungan amplitudo eksitasi terhadap RMS nilai percepatan *angular* hasil dari eksperimen yang telah dilakukan. Eksperimen dilakukan untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 2600

pada setiap posisi peletakan sesuai dengan skema pada gambar 4.22(b). Pada grafik di atas terlihat bahwa eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi tinggi menghasilkan percepatan *angular* dengan nilai tinggi. Eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 m untuk sistem dengan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 1 menghasilkan nilai percepatan *angular* tertinggi, yaitu  $0,2226 \text{ rad/s}^2$ . Sedangkan, nilai percepatan *angular* terendah dihasilkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,02 m untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 3. Nilai percepatan *angular* tersebut sebesar  $0,0559 \text{ rad/s}^2$ .

Nilai percepatan *angular* dari eksperimen sistem utama dengan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 1 menunjukkan nilai yang semakin tinggi ketika menggunakan amplitudo eksitasi yang digunakan semakin tinggi. Hal yang sama juga terlihat pada *trendline* percepatan *angular* hasil dari eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 2 dan 3. Hal ini sesuai dengan hasil perhitungan menggunakan teori *dynamic vibration absorber*. Hasil perhitungan tersebut juga ditunjukkan oleh *bode diagram* yang telah dibuat dengan menggunakan *software* Simulink MATLAB. Dari *bode diagram* tersebut terlihat bahwa nilai puncak dari respon amplitudo sistem semakin tinggi untuk amplitudo eksitasi yang semakin tinggi.



Gambar 4.23 (a)Grafik RMS Percepatan *Angular* Variasi Jumlah Lilitan 3500; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.23(a) di atas menunjukkan grafik hubungan amplitudo eksitasi terhadap percepatan *angular* yang dihasilkan dari eksperimen untuk sistem utama. Grafik tersebut dapat digunakan untuk membandingkan nilai percepatan *angular* dari hasil eksperimen sistem utama tanpa EMVA dan sistem utama dengan EMVA. Eksperimen dilakukan menggunakan variasi amplitudo eksitasi untuk sistem utama dengan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan 3500 pada setiap posisi peletakan sesuai dengan skema seperti gambar 4.23(b). Nilai percepatan *angular* tertinggi dihasilkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 3500 pada posisi 2, nilainya sebesar 0,2294 rad/s<sup>2</sup>. Sedangkan, nilai percepatan *angular* terendah sebesar 0,0815 rad/s<sup>2</sup> diperoleh dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,02 m untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 3500 yang diletakkan pada posisi 3.

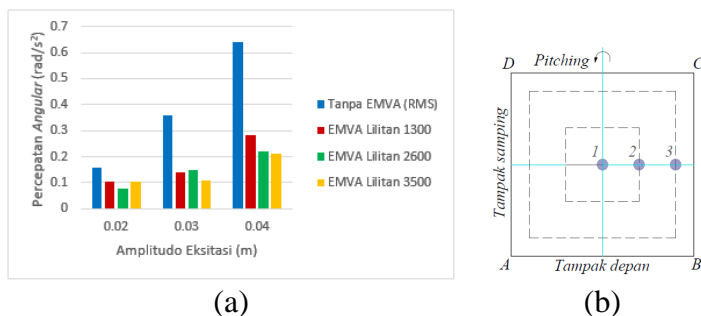
*Trendline* hasil eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 3500 yang diletakkan pada posisi 1 dan 3 sesuai dengan hasil perhitungan menggunakan teori *dynamic vibration absorber*, bahwa respon amplitudo sistem akan semakin tinggi apabila amplitudo eksitasi yang digunakan semakin tinggi. Namun, *trendline* hasil eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 3500 yang diletakkan pada posisi 2 kurang sesuai dengan hasil perhitungan dan *bode diagram*. Hal ini dikarenakan adanya kesalahan dalam pengambilan data, seperti pengambilan data dilakukan dalam kondisi yang belum stabil. Namun, *trendline* hasil eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 3500 sudah sesuai dengan hasil perhitungan menggunakan teori DVA.

Dari ketiga grafik di atas, dapat dikatakan bahwa penambahan EMVA mampu meredam getaran arah *pitching* dari sistem utama. Hal ini terlihat dari nilai percepatan *angular* untuk sistem utama dengan penambahan EMVA menjadi lebih rendah dibandingkan dengan nilai percepatan *angular* hasil dari eksperimen untuk sistem utama tanpa EMVA. Dari analisa yang telah dilakukan, diperoleh nilai percepatan *angular* tertinggi sebesar  $0,2831 \text{ rad/s}^2$ , dimana nilai tersebut merupakan hasil dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 m untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 1300 yang diletakkan pada posisi 1. Nilai percepatan *angular* terendah merupakan hasil dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,02 m untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 3, nilainya sebesar  $0,0559 \text{ rad/s}^2$ . Pada ketiga grafik di atas, terlihat bahwa eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,04

m mampu menghasilkan respon getaran *pitching* berupa percepatan *angular* dengan nilai yang lebih tinggi dibandingkan respon getaran *pitching* hasil dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi sebesar 0,02 m dan 0,03 m. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa sistem utama dengan amplitudo eksitasi 0,04 m membutuhkan EMVA untuk meredam respon getaran *pitching* yang nilainya relatif tinggi dibandingkan sistem utama dengan amplitudo 0,02 m dan 0,03 m.

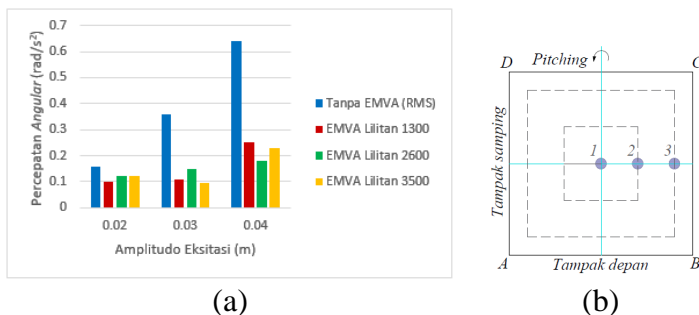
#### 4.3.2.2.2 Analisa Variasi Amplitudo Eksitasi terhadap Respon Percepatan Angular pada Setiap Variasi Posisi Peletakan EMVA

Pada penelitian ini, eksperimen dilakukan untuk mengetahui respon getaran arah *pitching* berupa RMS nilai percepatan *linear*. Eksperimen dilakukan menggunakan variasi amplitudo eksitasi untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan yang diletakkan pada setiap variasi posisi peletakan EMVA.



Gambar 4.24 (a)Grafik RMS Percepatan Angular Variasi Posisi 1; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

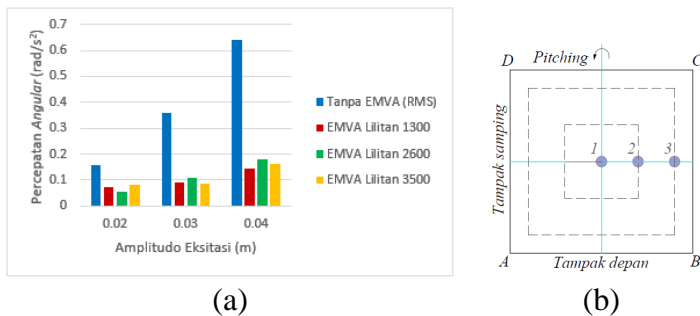
Gambar 4.24(a) di atas menunjukkan grafik hubungan amplitudo eksitasi terhadap nilai percepatan *angular* yang dihasilkan dari eksperimen untuk sistem utama dengan EMVA menggunakan setiap variasi jumlah lilitan yang diletakkan pada posisi 1. Skema posisi peletakan EMVA sesuai dengan gambar 4.24(b). Grafik tersebut juga dapat digunakan untuk membandingkan nilai percepatan *angular* sistem utama tanpa EMVA dan sistem utama dengan penambahan EMVA. Nilai tertinggi percepatan *angular* pada grafik di atas terlihat pada hasil eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 m untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 3500 yang diletakkan pada posisi 1, nilai tersebut sebesar 0,2831 rad/s<sup>2</sup>. Sedangkan nilai terendah percepatan *angular* pada grafik di atas dihasilkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,02 m untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 2, nilainya sebesar 0,0788 rad/s<sup>2</sup>.



Gambar 4.25 (a)Grafik RMS Percepatan *Angular* Variasi Posisi 2; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*



Gambar 4.25(a) di atas menggambarkan grafik hubungan amplitudo eksitasi terhadap nilai percepatan *angular* yang dihasilkan dari eksperimen menggunakan variasi jumlah lilitan pada posisi 2. Skema posisi peletakan seperti ditunjukkan pada gambar 4.25(b). Dari grafik di atas, terlihat bahwa nilai percepatan *angular* tertinggi dihasilkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 m untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 1300 yang diletakkan pada posisi 2, dimana nilainya sebesar  $0,2513 \text{ rad/s}^2$ . Sedangkan nilai percepatan *angular* terendah dihasilkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,03 m untuk sistem utama dengan EMVA variasi jumlah lilitan 3500 yang diletakkan pada posisi 2, nilai terendah tersebut sebesar  $0,0972 \text{ rad/s}^2$ .



Gambar 4.26 (a)Grafik RMS Percepatan *Angular* Variasi Posisi 3; (b)Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.26(a) di atas menggambarkan grafik hubungan amplitudo eksitasi terhadap nilai percepatan

*angular* yang dihasilkan dari eksperimen. Eksperimen dilakukan untuk sistem utama dengan penambahan EMVA setiap variasi jumlah lilitan yang diletakkan pada posisi 3. Grafik di atas juga dapat digunakan untuk membandingkan nilai percepatan *angular* dari sistem utama tanpa EMVA dan sistem utama dengan penambahan EMVA. Eksperimen untuk sistem utama dengan penambahan EMVA dapat menghasilkan nilai percepatan *angular* tertinggi sebesar  $0,1787 \text{ rad/s}^2$ . Nilai tertinggi tersebut didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi  $0,04 \text{ m}$  dengan variasi jumlah lilitan kumparan EMVA 2600 yang diletakkan pada posisi 3. Sedangkan, nilai terendah yang dihasilkan merupakan hasil eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi  $0,02 \text{ m}$  dengan variasi jumlah lilitan kumparan EMVA 2600 yang diletakkan pada posisi 2. Nilai terendah hasil eksperimen tersebut sebesar  $0,0559 \text{ rad/s}^2$ .

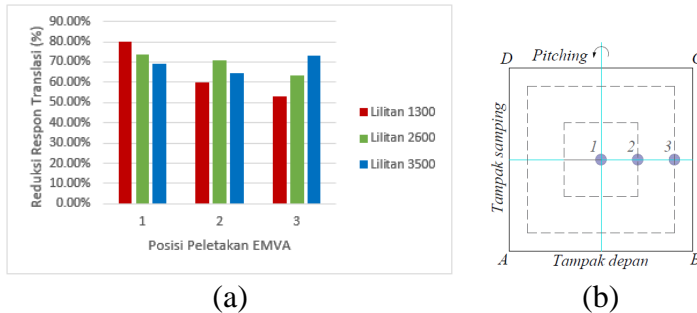
Dari ketiga grafik yang telah dilakukan analisa di atas, terlihat bahwa adanya penambahan EMVA dalam eksperimen dapat meredam getaran yang dihasilkan oleh sistem utama. Hal ini ditunjukkan oleh nilai percepatan *angular* yang menjadi lebih rendah ketika dilakukan eksperimen untuk sistem utama dengan penambahan EMVA, dibandingkan dengan nilai percepatan *angular* yang dihasilkan oleh sistem utama tanpa EMVA. Dari analisa ketiga grafik di atas, didapatkan nilai percepatan *angular* tertinggi sebesar  $0,2831 \text{ rad/s}^2$  yang dihasilkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi  $0,04 \text{ m}$  untuk sistem utama dengan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan EMVA 1300 yang diletakkan pada posisi 1. Sedangkan nilai percepatan *angular* terendah dari hasil analisa ketiga grafik di atas adalah  $0,0559 \text{ rad/s}^2$ . Nilai

percepatan *angular* terendah didapatkan dari eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,02 untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 3. Pada ketiga grafik di atas juga terlihat bahwa eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi sebesar 0,04 dapat menghasilkan nilai percepatan *angular* yang lebih tinggi dibandingkan menggunakan eksperimen menggunakan variasi amplitudo lainnya, yaitu 0,02 m dan 0,03 m. Hal ini sesuai dengan teori DVA, yaitu respon amplitudo dengan nilai puncak yang sangat besar perlu penambahan peredam untuk mereduksi respon getaran yang dihasilkan dan menghilangkan efek resonansi. Puncak efek resonansi aslinya dihilangkan menjadi dua puncak baru seperti yang ditunjukkan pada *bode diagram* pada gambar 4.10 dan 4.11.

#### **4.3.2.3 Analisa Variasi Posisi Peletakan EMVA terhadap Reduksi Respon Getaran**

Pada penelitian ini dilakukan eksperimen untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan, dimana EMVA akan diletakkan pada 3 posisi yang tegak lurus dengan sumbu putar getaran arah *pitching*. Pada sub bab ini, akan dilakukan pembahasan mengenai hasil eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 m yang telah dilakukan. Hal ini dikarenakan, eksperimen tersebut menghasilkan respon percepatan dan tegangan bangkitan yang cenderung tinggi. Selain itu, pada penelitian ini, eksperimen dibatasi dengan menggunakan amplitudo eksitasi paling besar sebesar 0,04 m yang dapat diatur pada massa eksentris sistem utama. Hasil eksperimen yang akan dibahas pada sub bab ini berupa

besarnya reduksi respon getaran (dalam bentuk persentase) untuk arah translasi maupun *pitching*.

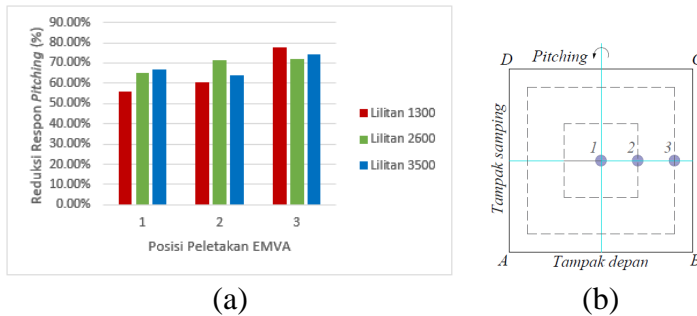


Gambar 4.27 (a)Grafik Posisi Peletakan EMVA terhadap Reduksi Respon Getaran Arah Translasi; (b) Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.27(a) di atas menggambarkan grafik hubungan posisi peletakan EMVA terhadap persentase reduksi respon getaran arah translasi. Peletakan EMVA pada plat *exciter* dilakukan sesuai dengan gambar 4.27(b) di atas. Pada grafik di atas, terdapat nilai tertinggi untuk reduksi respon getaran arah translasi hasil eksperimen pada setiap posisi peletakan EMVA dengan variasi jumlah lilitan yang berbeda. Dari hasil eksperimen untuk sistem utama dengan EMVA yang diletakkan pada posisi 1, didapatkan nilai reduksi respon translasi tertinggi sebesar 80,07% dengan variasi jumlah lilitan EMVA 1300. Pada posisi 2, nilai reduksi respon translasi tertinggi yang dihasilkan dari eksperimen sebesar 71,04% untuk sistem utama dengan EMVA variasi 2600. Sedangkan dari eksperimen dengan EMVA yang diletakkan pada posisi 3, didapatkan nilai reduksi respon getaran translasi tertinggi sebesar 73,28% dengan menggunakan EMVA variasi

jumlah lilitan 3500. Pada grafik di atas juga terlihat nilai reduksi respon getaran translasi terendah sebesar 52,99% yang merupakan hasil eksperimen untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 1300, diletakkan pada posisi 3. Pada grafik di atas, terlihat bahwa nilai reduksi getaran pada posisi 1 cenderung lebih tinggi dibandingkan pada posisi 2 dan 3. Hal ini dikarenakan peletakan *probe accelerometer* untuk mendeteksi getaran translasi diletakkan pada posisi 1.

*Trendline* hasil eksperimen pada grafik di atas menunjukkan persentase nilai reduksi getaran yang cenderung menurun ketika EMVA di posisi 2 dan 3. Hal ini juga terlihat pada gambar 30 yang menunjukkan grafik hubungan posisi peletakan EMVA terhadap reduksi getaran translasi untuk variasi amplitudo eksitasi 0,02 m dan gambar 33 untuk variasi amplitudo eksitasi 0,03 m (terlampir). Hal ini dikarenakan oleh pengaruh dari peletakan *probe accelerometer* untuk mendeteksi arah translasi yang diletakkan di posisi 1 untuk eksperimen dengan setiap variasi posisi peletakan EMVA. Namun, *trendline* grafik di atas menunjukkan nilai yang kurang tepat untuk eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 3500. Hal ini dikarenakan adanya kesalahan dalam pengambilan data, seperti pengambilan data dilakukan pada kondisi yang kurang stabil.



Gambar 4.28 (a)Grafik Posisi Peletakan EMVA terhadap Reduksi Respon Getaran Arah *Pitching*; (b) Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.28(a) di atas menggambarkan grafik hubungan posisi peletakan EMVA terhadap persentase reduksi respon getaran arah *pitching*. Posisi peletakan EMVA yang dianalisa sesuai dengan gambar 4.28(b) di atas. Dari grafik di atas, dapat diketahui nilai respon reduksi tertinggi dari eksperimen untuk sistem utama dengan penambahan EMVA pada setiap posisi peletakannya. Pada posisi 1, didapatkan nilai reduksi respon getaran *pitching* tertinggi sebesar 67,06% yang merupakan hasil eksperimen untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 3500. Pada posisi 2, didapatkan nilai reduksi respon getaran *pitching* tertinggi sebesar 71,60%, hasil dari eksperimen untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 2600. Sedangkan pada posisi 3, didapatkan nilai reduksi respon getaran *pitching* tertinggi sebesar 77,69% yang merupakan hasil eksperimen untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan 1300. Grafik di atas juga menunjukkan nilai terendah dari respon

reduksi arah *pitching* sebesar 55,68%, hasil eksperimen untuk sistem utama dengan penambahan EMVA variasi jumlah lilitan kumparan 1300 yang diletakkan pada posisi 1. Pada grafik di atas, terlihat bahwa nilai reduksi getaran pada posisi 3 cenderung lebih tinggi dibandingkan pada posisi 1 dan 2. Hal ini dikarenakan peletakan *probe accelerometer* untuk mendeteksi getaran *pitching* diletakkan pada posisi 3.

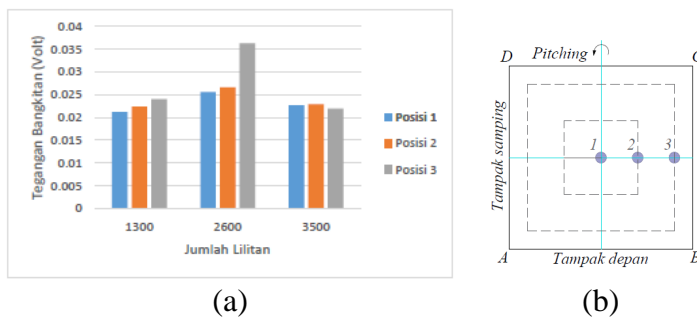
*Trendline* hasil eksperimen pada grafik di atas menunjukkan persentase nilai reduksi getaran yang cenderung meningkat ketika EMVA diletakkan pada posisi 2 dan 3. Hal ini juga terlihat pada gambar 31 yang menunjukkan grafik hubungan posisi peletakan EMVA terhadap reduksi getaran *pitching* untuk variasi amplitudo eksitasi 0,02 m dan gambar 34 untuk variasi amplitudo eksitasi 0,03 m (terlampir). Hal ini dikarenakan oleh pengaruh dari peletakan *probe accelerometer* untuk mendeteksi arah *pitching* yang diletakkan di posisi 3 untuk eksperimen dengan setiap variasi posisi peletakan EMVA. Namun, *trendline* grafik di atas menunjukkan nilai yang kurang tepat untuk eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 3500. Hal ini dikarenakan adanya kesalahan dalam pengambilan data, seperti pengambilan data dilakukan pada kondisi yang kurang stabil.

Grafik reduksi respon getaran arah translasi maupun *pitching* menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan EMVA dapat meredam getaran dari sistem utama. Jumlah lilitan tidak mempengaruhi besarnya reduksi respon getaran yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan fungsi dari kumparan bukanlah untuk meredam sistem, namun untuk merubah redaman sistem *absorber* berupa osilasi dari magnet menjadi energi listrik.

Dengan kata lain, kumparan EMVA berfungsi untuk merubah energi kinetik massa *absorber* akibat getaran sistem utama menjadi energi listrik.

#### 4.3.2.4 Analisa Variasi Jumlah Lilitan terhadap Tegangan Bangkitan dari EMVA

Pada penelitian ini, telah dilakukan eksperimen untuk mereduksi getaran dari sistem utama dan merubahnya menjadi energi listrik. Eksperimen pada penelitian ini menggunakan prinsip elektromagnetik, dimana magnet di dalam EMVA berosilasi dan menimbulkan medan magnet, memotong tegak lurus dengan lilitan kumparan EMVA sehingga mengakibatkan terjadinya induksi elektromagnetik.



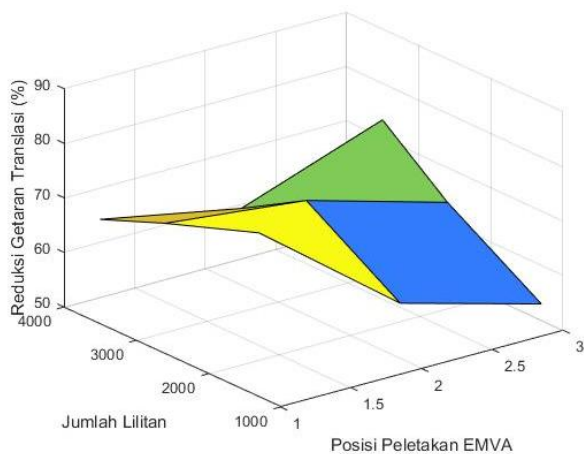
Gambar 4.29 (a)Grafik Tegangan Bangkitan Hasil Eksperimen; (b)Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.29(a) di atas merupakan grafik hubungan jumlah lilitan EMVA yang digunakan dalam eksperimen terhadap tegangan bangkitan yang dihasilkan dari eksperimen. Eksperimen dilakukan untuk sistem utama dengan penambahan EMVA yang sesuai dengan

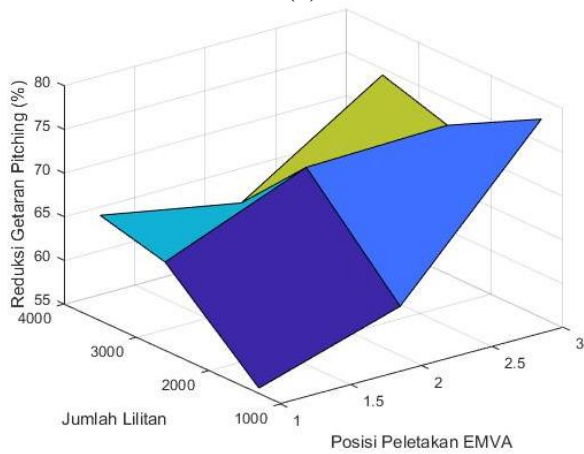


skemanya pada gambar 4.29(b). Grafik di atas menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 1, 2, dan 3 berturut-turut sebesar 0,0256 volt, 0,0266 volt dan 0,0363 volt. Eksperimen dengan menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 3 menghasilkan nilai tegangan bangkitan tertinggi. Namun, berdasarkan analisa eksperimen pada sub bab sebelumnya, nilai reduksi respon getaran arah translasi dan *pitching* pada eksperimen tersebut merupakan nilai terendah di antara hasil eksperimen menggunakan EMVA variasi 2600 yang diletakkan pada posisi 1 dan 2.

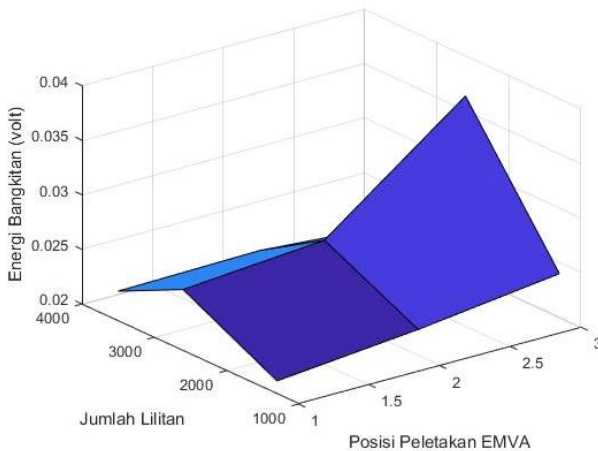
*Trendline* hasil eksperimen pada grafik di atas menunjukkan persentase nilai tegangan bangkitan yang cenderung tinggi ketika eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan yang lebih banyak. Namun, hasil eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 3500 menunjukkan nilai yang lebih kecil daripada eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 2600. Hal yang sama juga terlihat pada gambar 32 yang menunjukkan grafik hubungan jumlah lilitan terhadap tegangan bangkitan untuk variasi amplitudo eksitasi 0,02 m dan gambar 34 untuk variasi amplitudo eksitasi 0,03 m (terlampir). Hal ini dikarenakan adanya pengaruh dari tebal kumparan EMVA yang digunakan dalam eksperimen. Dengan panjang kumparan yang sama, maka kumparan menjadi lebih tebal untuk jumlah lilitan yang lebih banyak. Sehingga, fluks magnetik tidak dapat menembus secara keseluruhan tebal kumparan.



(a)



(b)



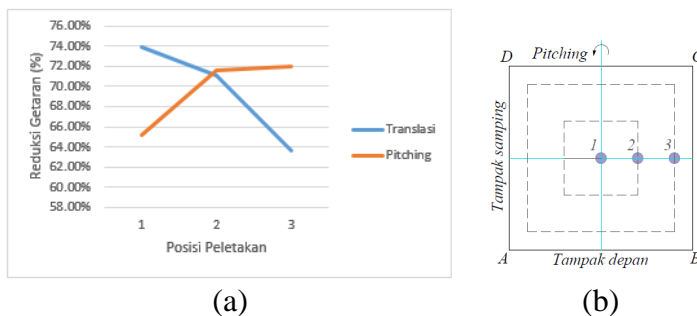
(c)

Gambar 4.30 Grafik *Surface* Hubungan Jumlah Lilitan dan Posisi Peletakan EMVA terhadap (a)Reduksi Getaran Translasi; (b)Reduksi Getaran Pitching; (c)Energi Bangkitan

Gambar 4.30(a) menunjukkan bahwa nilai reduksi getaran translasi tertinggi sebesar 80,07% dihasilkan dari eksperimen menggunakan amplitudo 0,04 untuk sistem utama dengan EMVA variasi jumlah lilitan 1300 yang diletakkan pada posisi 1. Namun pada gambar 4.30(b) terlihat bahwa dari eksperimen yang sama, nilai reduksi *pitching* merupakan nilai terendah, sebesar 55,68%. Dari eksperimen tersebut, energi bangkitan yang dihasilkan merupakan nilai terkecil, yaitu 0,0212 volt. Sehingga, dapat dikatakan bahwa eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 1300 yang diletakkan pada posisi 1 tidak menghasilkan data yang optimal. Pada gambar 4.30(a) menunjukkan bahwa eksperimen menggunakan amplitudo eksitasi 0,04 untuk sistem utama dengan

EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 2 juga dapat menghasilkan nilai reduksi getaran translasi yang tinggi, sebesar 73,88% dengan nilai reduksi getaran *pitching* sebesar 65,15% dan energi bangkitan sebesar 0,0266 volt.

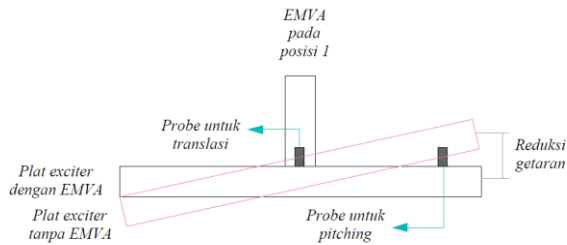
Dari ketiga nilai tegangan bangkitan tertinggi pada gambar 4.29(a), diketahui bahwa hasil eksperimen untuk reduksi respon translasi dan *pitching* tertinggi adalah nilai reduksi untuk eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 2.



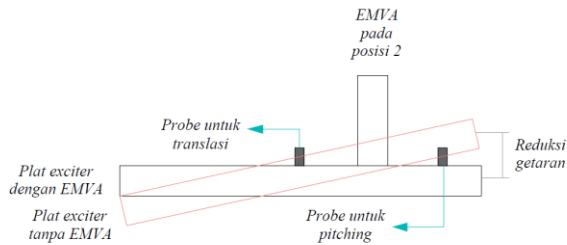
Gambar 4.31 (a)Grafik Hubungan Posisi Peletakan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 2600 terhadap Reduksi Getaran Translasi dan *Pitching*; (b)Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

Pada grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4.31(a) terlihat titik perpotongan untuk nilai reduksi getaran translasi dan *pitching* pada posisi 2 untuk EMVA variasi jumlah lilitan 2600. Pada grafik tersebut menunjukkan nilai reduksi translasi tertinggi dihasilkan dari eksperimen menggunakan EMVA pada posisi 1. Namun, pada eksperimen tersebut menghasilkan nilai reduksi getaran

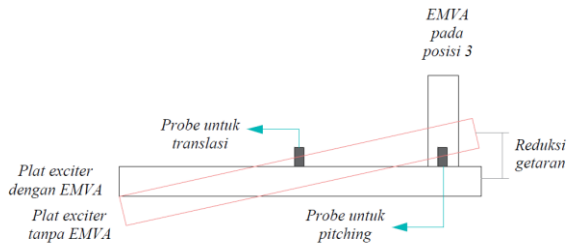
*pitching* yang rendah. Sedangkan, eksperimen menggunakan EMVA pada posisi 3 menghasilkan nilai reduksi getaran *pitching* dengan nilai getaran translasi rendah.



(a)



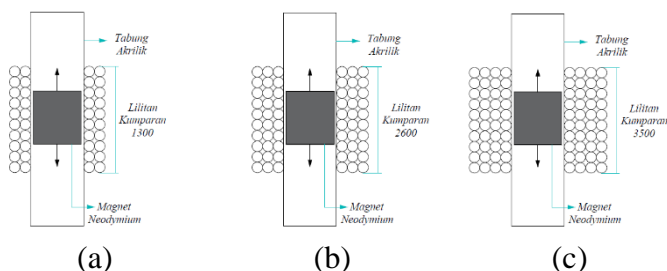
(b)



(c)

Gambar 4.32 Ilustrasi Peletakan EMVA dan *Probe Accelerometer* pada *Plat Exciter* (a)EMVA pada Posisi 1; (b)EMVA pada Posisi 2; (c)EMVA pada Posisi 3

Eksperimen dilakukan dengan meletakkan *probe accelerometer* pada posisi 1 dan 3. Hal ini dapat mempengaruhi besarnya reduksi getaran yang dihasilkan dalam eksperimen. Ketika melakukan eksperimen sistem utama dengan EMVA pada posisi 1 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.32(a), nilai reduksi getaran translasi yang dihasilkan cenderung tinggi, namun nilai reduksi getaran *pitching* yang dihasilkan pada eksperimen ini cenderung rendah. Sebaliknya, ketika EMVA diletakkan pada posisi 3 seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.32(c), nilai reduksi getaran *pitching* cenderung tinggi dan nilai getaran translasi cenderung rendah. Sehingga, hasil reduksi getaran yang didapatkan tidak optimal untuk kedua getaran tersebut. Ketika melakukan eksperimen sistem utama dengan EMVA pada posisi 2, dimana EMVA diletakkan di antara *probe accelerometer* getaran arah translasi dan *pitching* seperti pada gambar 4.32(b), nilai reduksi yang dihasilkan dapat dikatakan optimal terhadap getaran arah translasi dan *pitching*, karena tidak ada ketimpangan untuk salah satu arah getarannya.



Gambar 4.33 Ilustrasi EMVA yang Digunakan dalam Eksperimen (a)Variasi Jumlah Lilitan 1300; (b)Variasi Jumlah Lilitan 2600; (c)Variasi Jumlah Lilitan 3500

Pada gambar 4.33 di atas menunjukkan kumparan variasi lilitan 3500 lebih tebal dibandingkan dengan kumparan variasi jumlah lilitan 1300 dan 2600. Ketika eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 1300, nilai energi bangkitan yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan variasi jumlah lilitan yang lebih banyak. Namun, ketika eksperimen dilakukan menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 3500, energi bangkitan yang dihasilkan tidak lebih besar dari energi bangkitan hasil eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 2600. Hal ini dikarenakan medan magnet akibat osilasi magnet *neodymium* tidak memotong tegak lurus secara keseluruhan dari jumlah lilitan kumparan sebanyak 3500. Dengan demikian, hasil eksperimen yang paling optimal didapatkan dari eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 2, dengan nilai reduksi getaran translasi sebesar 71,04% dan 71,60% untuk reduksi getaran *pitching*. Dari eksperimen tersebut menghasilkan energi bangkitan sebesar 0,0266 volt.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari eksperimen yang telah dilakukan pada penelitian ini, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah dirancang sebuah peredam yaitu EMVA (*Electromagnetic Vibration Absorber*) yang digunakan untuk meredam getaran arah translasi dan *pitching* pada sistem utama serta merubahnya menjadi energi listrik. EMVA terdiri dari pegas baja dengan konstanta pegas sebesar 580,4733 N/m, massa *absorber* berupa magnet *neodymium* dan lempeng baja dengan massa 0,34 kg, *shell body* berupa tabung akrilik yang menyatu dengan kumparan kawat variasi jumlah lilitan 1300, 2600 dan 3500.
2. Nilai RMS respon percepatan didapatkan dari eksperimen sistem utama tanpa EMVA menggunakan variasi amplitudo eksitasi 0,02 m, 0,03 m, dan 0,04 m secara berturut-turut sebesar  $0,0306 \text{ m/s}^2$ ,  $0,0757 \text{ m/s}^2$ , dan  $0,1340 \text{ m/s}^2$  untuk arah translasi, serta  $0,1559 \text{ rad/s}^2$ ,  $0,3594 \text{ rad/s}^2$ , dan  $0,6387 \text{ rad/s}^2$  untuk arah *pitching*. Semakin tinggi amplitudo eksitasi yang digunakan dalam eksperimen, maka respon amplitudo sistem akan semakin tinggi. Sehingga, peredam sangat diperlukan untuk mengurangi getaran yang dihasilkan dari sistem dengan respon percepatan



tinggi yaitu sistem ketika dioperasikan menggunakan amplitudo eksitasi tinggi.

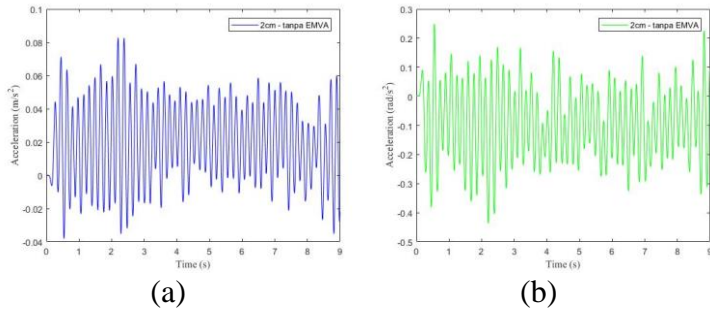
3. Reduksi respon percepatan optimal didapatkan dari eksperimen sistem utama menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 2, nilainya sebesar 71,04% untuk arah translasi dengan nilai RMS percepatan *linear*  $0,0388 \text{ m/s}^2$  dan 71,60% untuk arah *pitching* dengan nilai RMS percepatan *angular*  $0,1814 \text{ rad/s}^2$ .
4. Energi bangkitan yang paling optimal didapatkan dari eksperimen menggunakan EMVA variasi jumlah lilitan 2600 yang diletakkan pada posisi 2, sebesar 0,0266 volt.

## 5.2 Saran

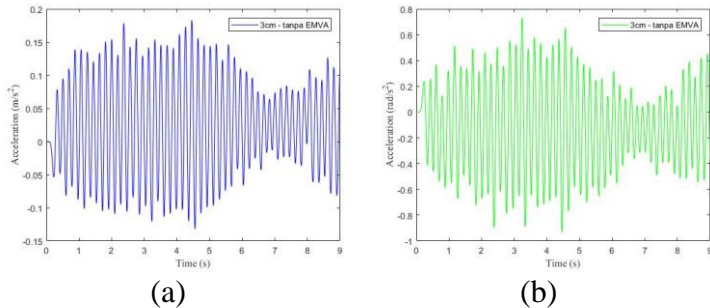
Adapun saran dari penelitian yang telah dilakukan dengan metode eksperimen adalah sebagai berikut:

1. Sebaiknya pegas untuk menopang sistem utama diganti dengan yang baru karena nilai konstantanya tidak sesuai dengan kondisi awal. Jika terus menerus digunakan, hasil yang didapat tidak akan maksimal.
2. Sebaiknya pengambilan data dilakukan dalam keadaan stabil agar data yang didapatkan akurat.
3. Sebaiknya diperiksa ulang pemasangan mur dan baut tidak ada yang longgar agar tidak mengganggu proses pengambilan data.

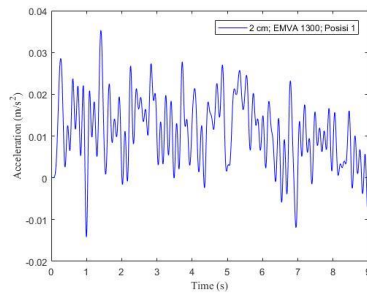
## LAMPIRAN



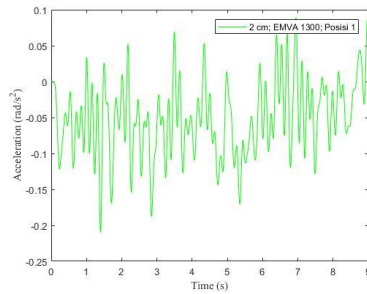
**Gambar 1** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,02m untuk Sistem Utama tanpa EMVA (a)Translasi; (b)*Pitching*



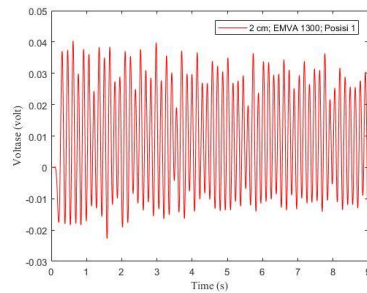
**Gambar 2** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,03m untuk Sistem Utama tanpa EMVA (a)Translasi; (b)*Pitching*



(a)

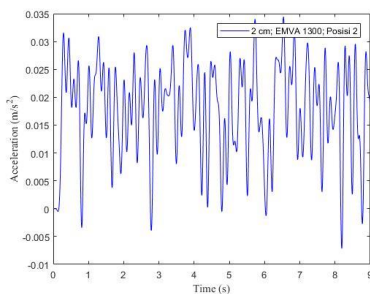


(b)

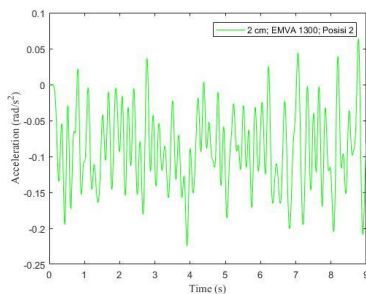


(c)

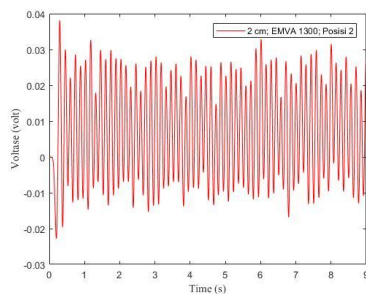
**Gambar 3** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,02m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 1300 pada Posisi 1 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

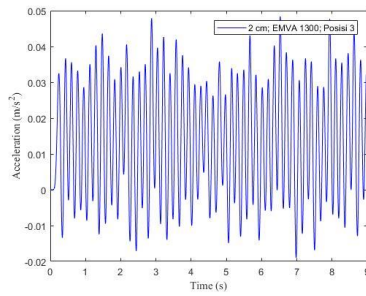


(b)

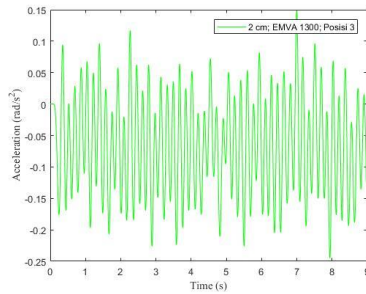


(c)

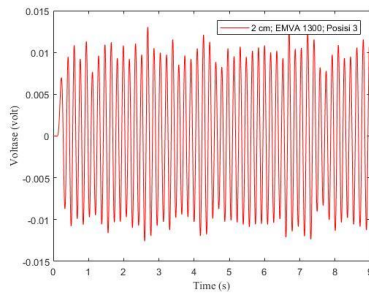
**Gambar 4** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,02m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 1300 pada Posisi 2 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

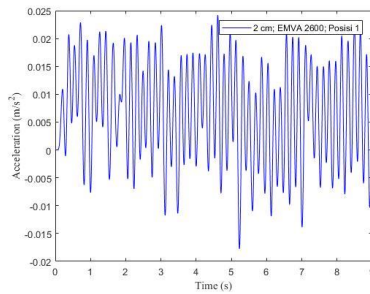


(b)

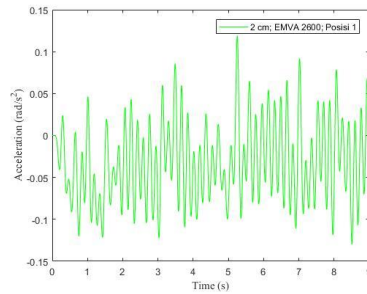


(c)

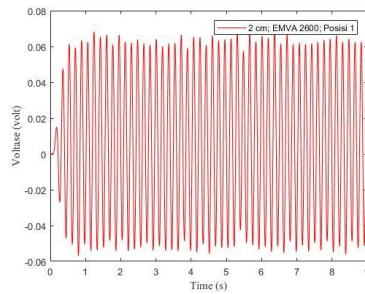
**Gambar 5** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,02m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 1300 pada Posisi 3 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

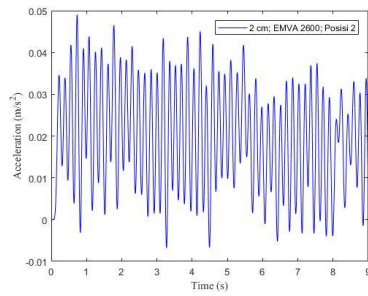


(b)

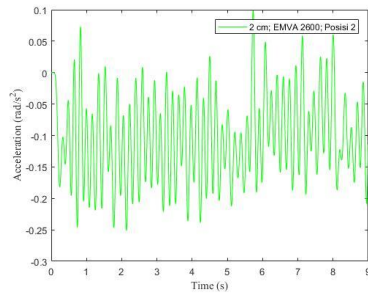


(c)

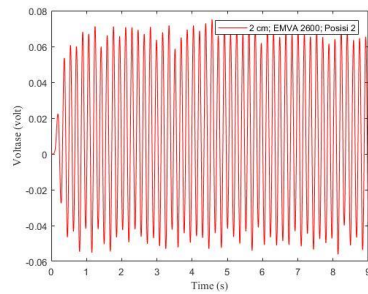
**Gambar 6** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,02m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 2600 pada Posisi 1 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

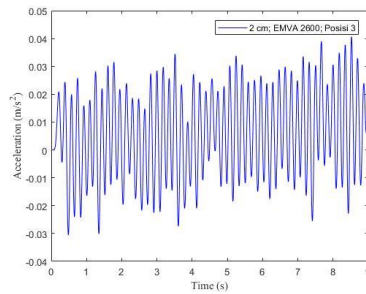


(b)

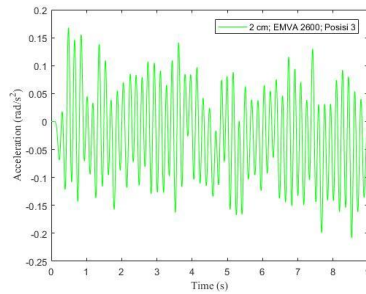


(c)

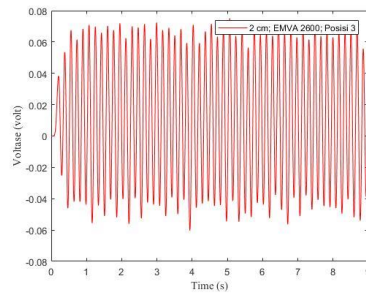
**Gambar 7** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,02m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 2600 pada Posisi 2 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)



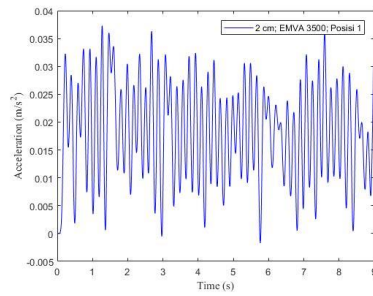
(b)



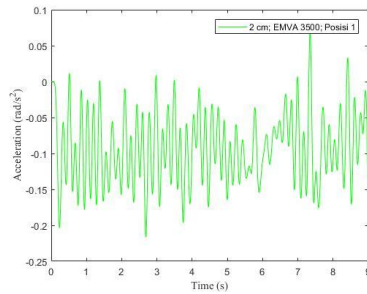
(c)

**Gambar 8** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,02m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 2600 pada Posisi 3 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase

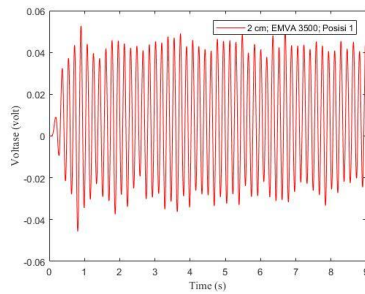




(a)

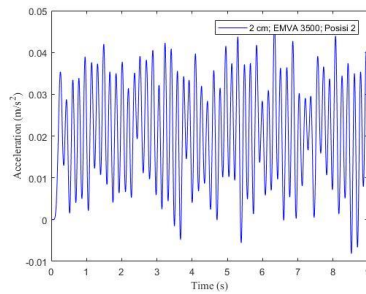


(b)

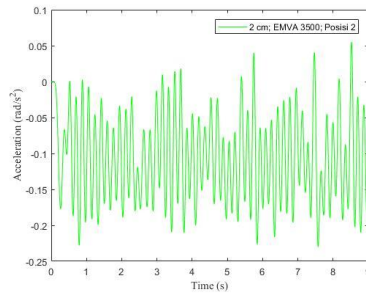


(c)

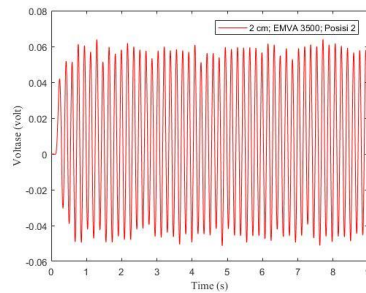
**Gambar 9** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,02m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 3500 pada Posisi 1 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

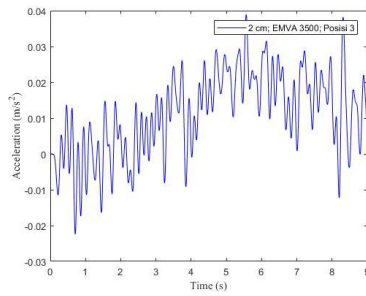


(b)

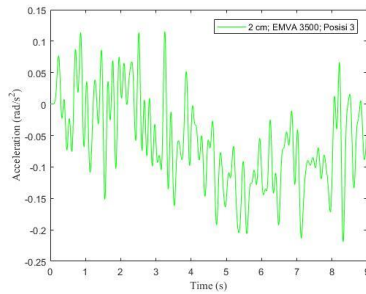


(c)

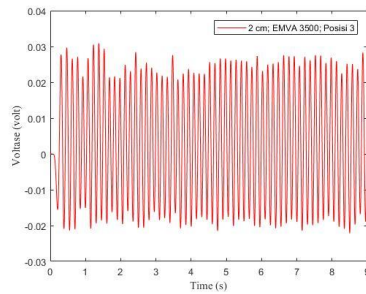
**Gambar 10** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,02m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 3500 pada Posisi 2 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

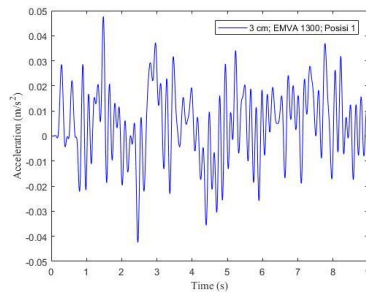


(b)

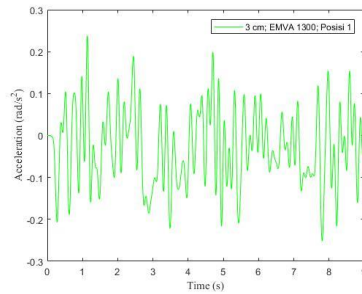


(c)

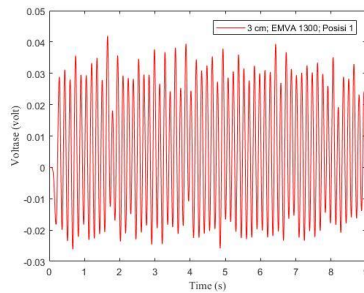
**Gambar 11** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,02m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 3500 pada Posisi 3 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

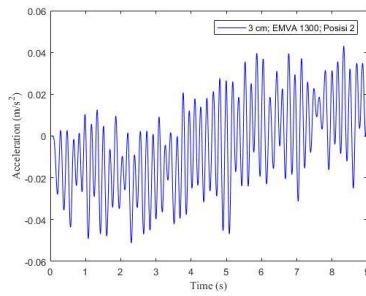


(b)

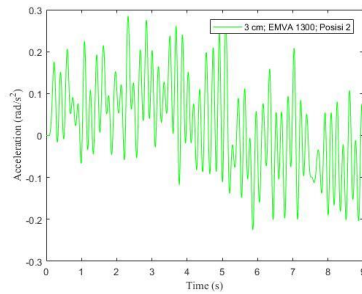


(c)

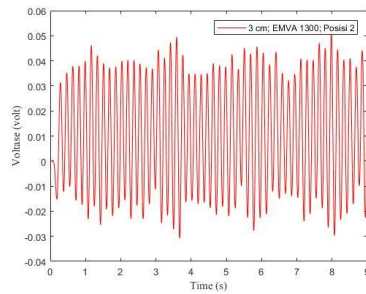
**Gambar 12** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,03m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 1300 pada Posisi 1 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

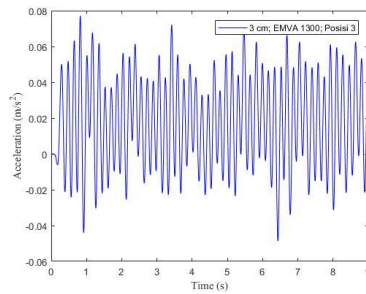


(b)

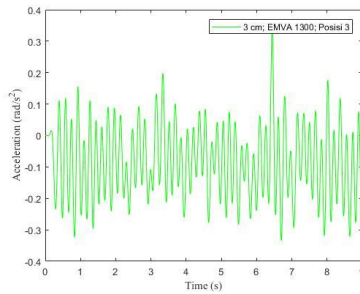


(c)

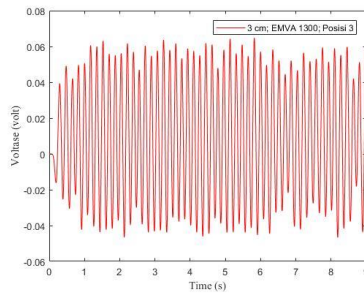
**Gambar 13** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,03m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 1300 pada Posisi 2 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

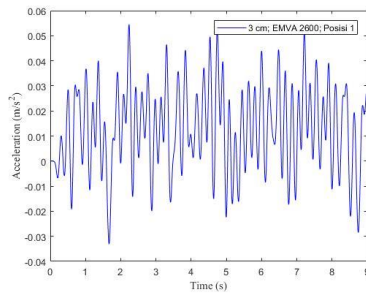


(b)

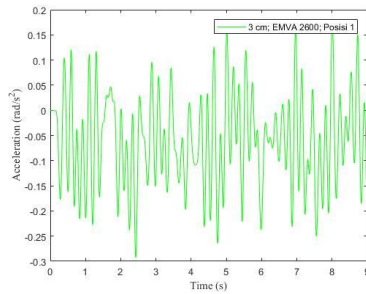


(c)

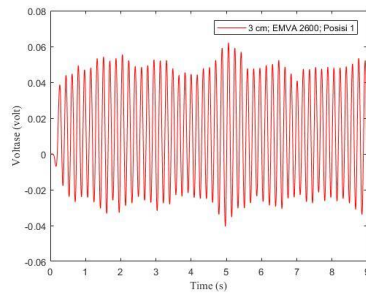
**Gambar 14** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,03m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 1300 pada Posisi 3 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

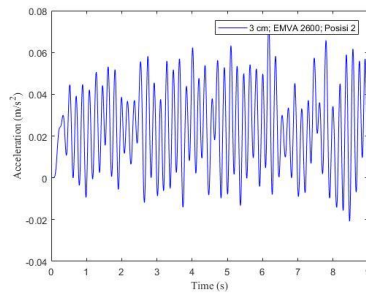


(b)

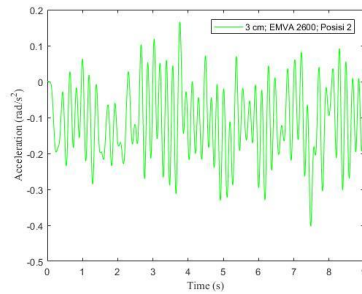


(c)

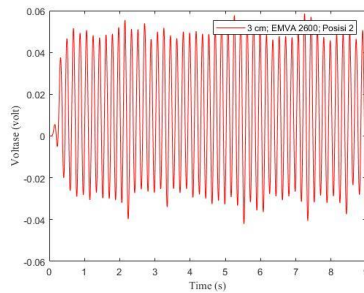
**Gambar 15** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,03m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 2600 pada Posisi 1 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)



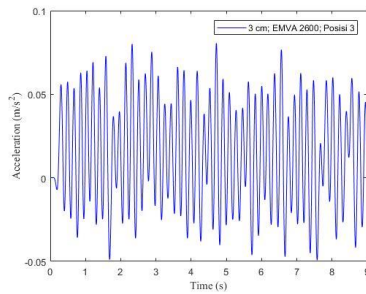
(b)



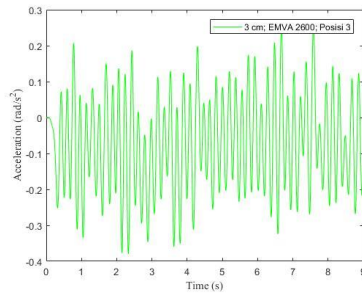
(c)

**Gambar 16** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,03m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 2600 pada Posisi 2 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase

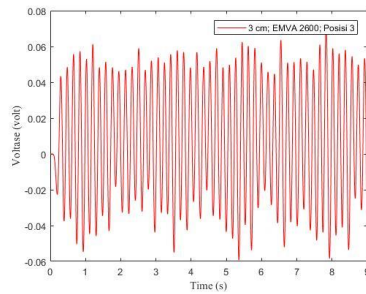




(a)

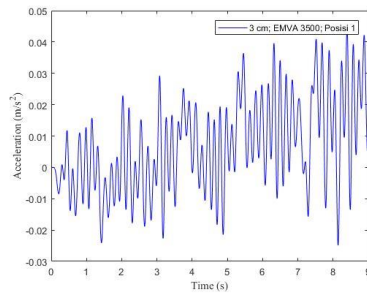


(b)

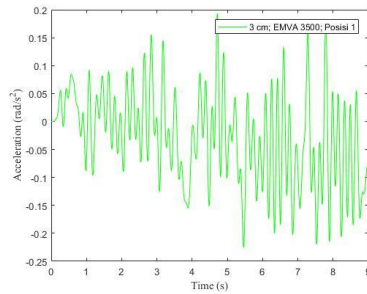


(c)

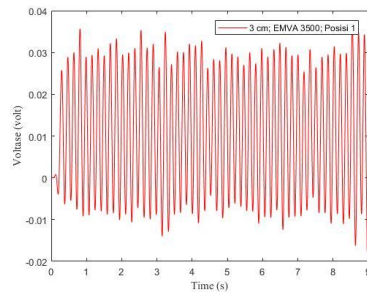
**Gambar 17** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,03m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 2600 pada Posisi 3 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

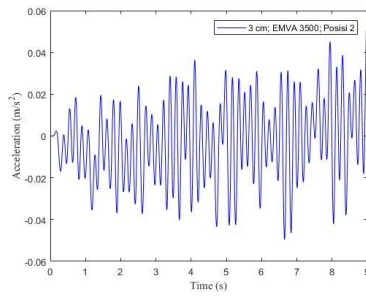


(b)

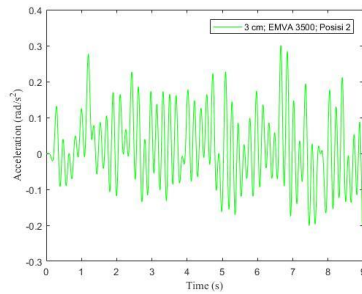


(c)

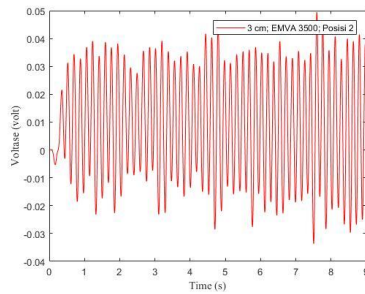
**Gambar 18** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,03m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 3500 pada Posisi 1 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

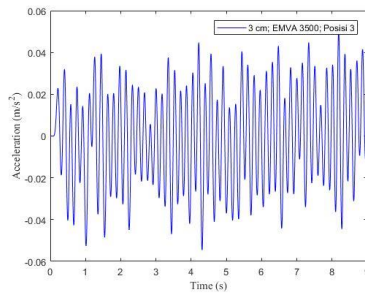


(b)

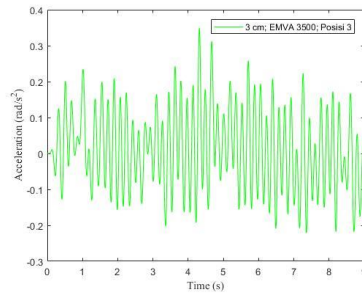


(c)

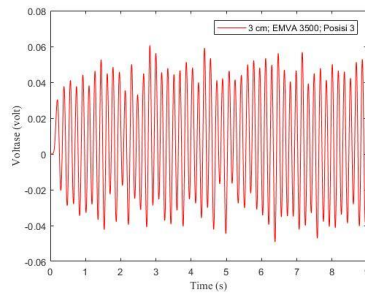
**Gambar 19** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,03m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 3500 pada Posisi 2 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

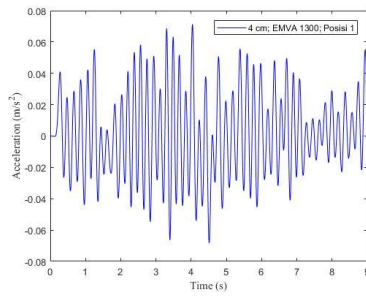


(b)

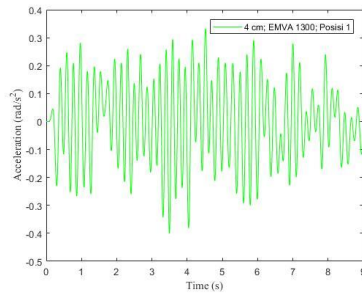


(c)

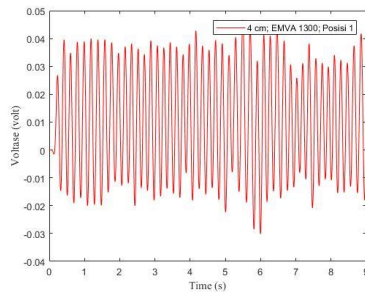
**Gambar 20** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,03m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 3500 pada Posisi 3 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

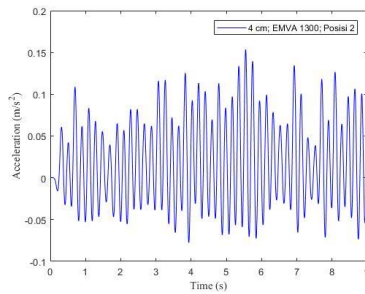


(b)

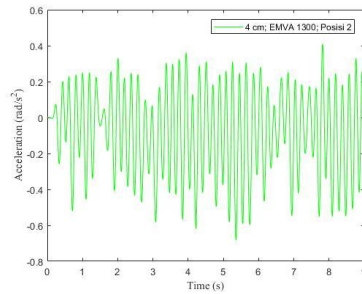


(c)

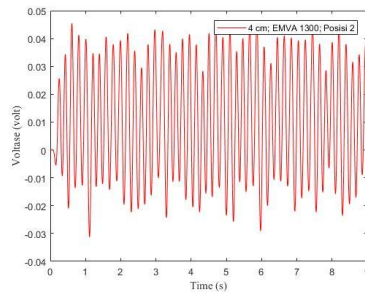
**Gambar 21** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,04m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 1300 pada Posisi 1 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

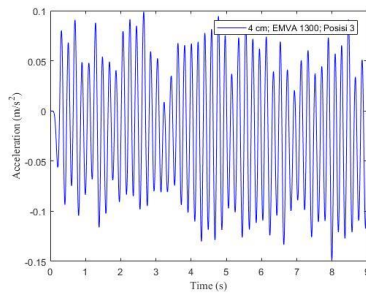


(b)

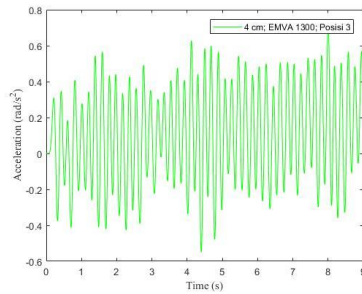


(c)

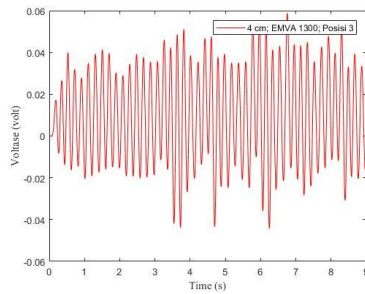
**Gambar 22** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,04m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 1300 pada Posisi 2 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

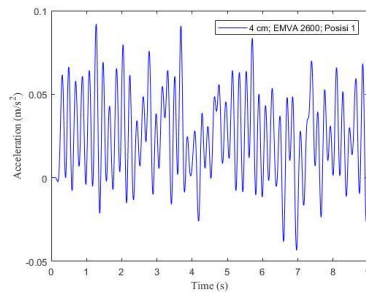


(b)

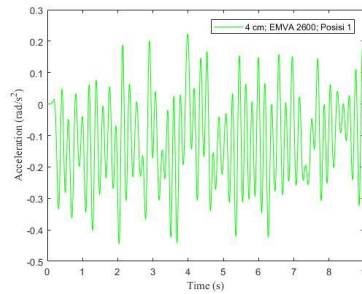


(c)

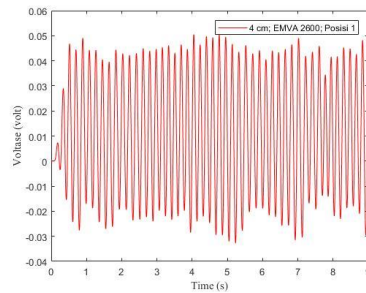
**Gambar 23** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,04m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 1300 pada Posisi 3 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)



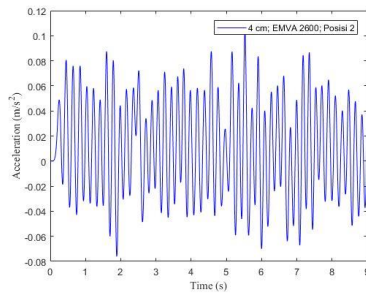
(b)



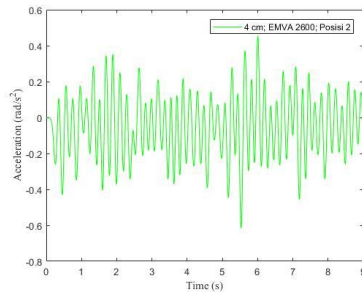
(c)

**Gambar 24** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,04m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 2600 pada Posisi 1 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase

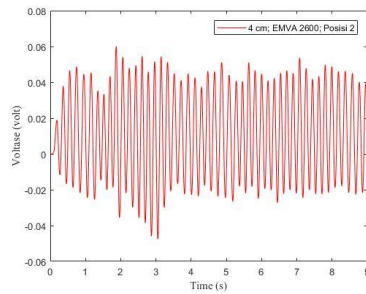




(a)

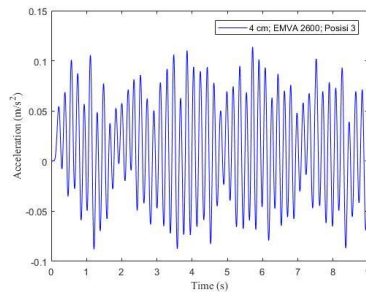


(b)

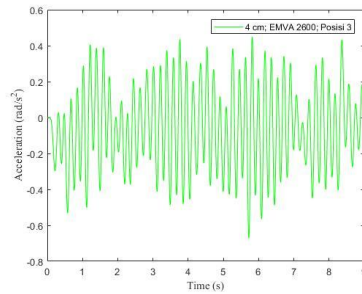


(c)

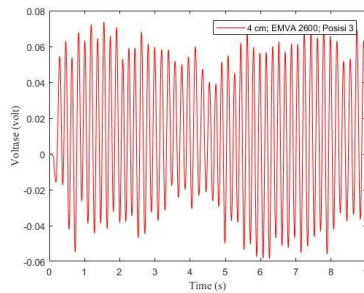
**Gambar 25** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,04m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 2600 pada Posisi 2 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

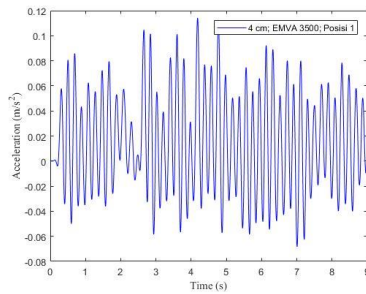


(b)

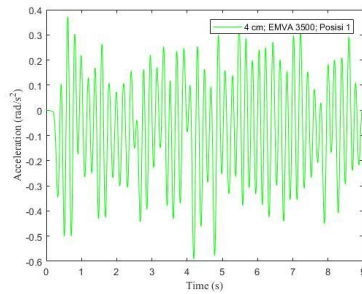


(c)

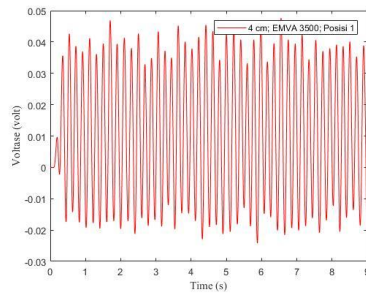
**Gambar 26** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,04m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 2600 pada Posisi 3 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

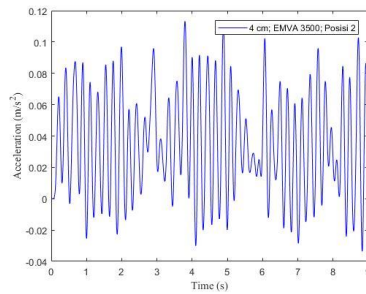


(b)

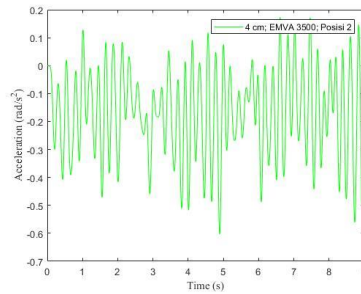


(c)

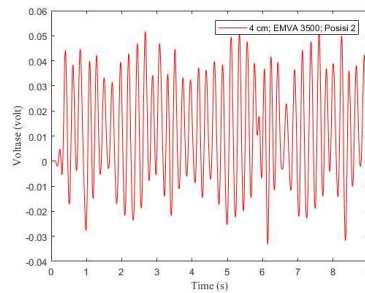
**Gambar 27** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,04m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 3500 pada Posisi 1 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

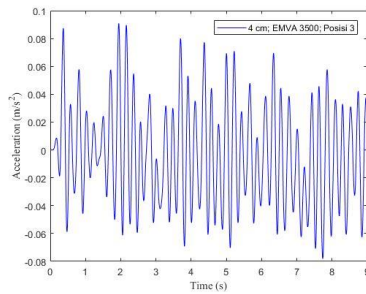


(b)

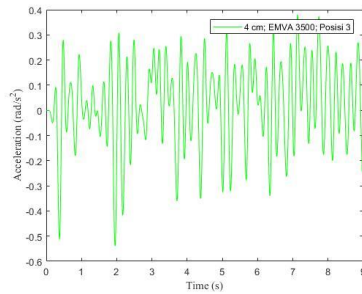


(c)

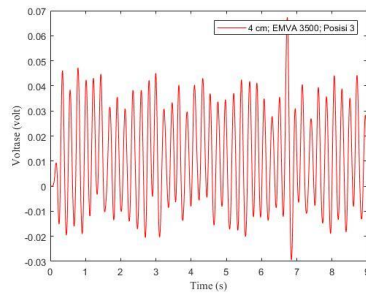
**Gambar 28** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,04m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 3500 pada Posisi 2 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



(a)

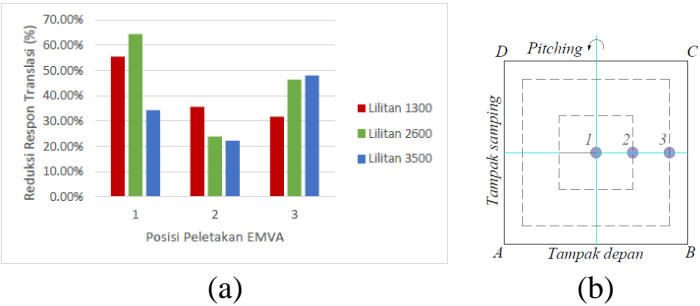


(b)

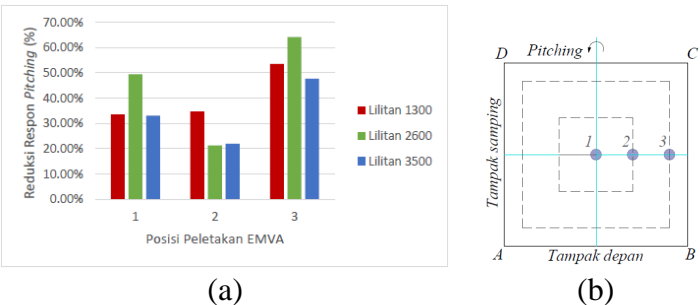


(c)

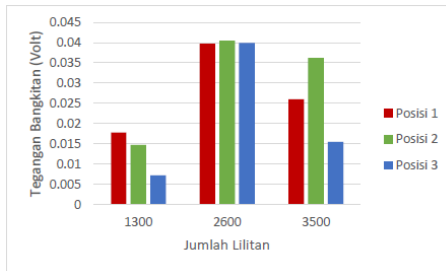
**Gambar 29** Hasil *Filtering* dan *Smoothing* Eksperimen Menggunakan Amplitudo Eksitasi 0,04m untuk Sistem Utama dengan EMVA Variasi Jumlah Lilitan 3500 pada Posisi 3 (a)Translasi; (b)*Pitching*; (c)Voltase



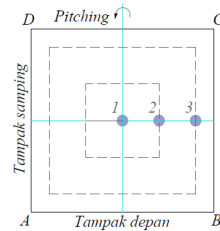
**Gambar 30** (a)Grafik Posisi Peletakan EMVA terhadap Reduksi Respon Translasi Variasi Amplitudo Eksitasi 0,02m; (b)Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*



**Gambar 31** (a)Grafik Posisi Peletakan EMVA terhadap Reduksi Respon *Pitching* Variasi Amplitudo Eksitasi 0,02m; (b)Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

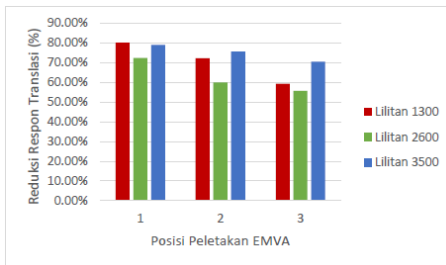


(a)

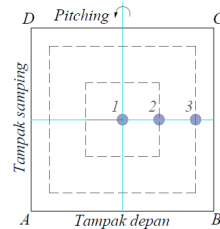


(b)

**Gambar 32** (a) Grafik Jumlah Lilitan EMVA terhadap Tegangan Bangkitan yang Dihasilkan Variasi Amplitudo Eksitasi 0,02m; (b) Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

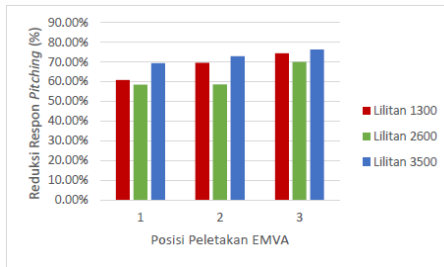


(a)

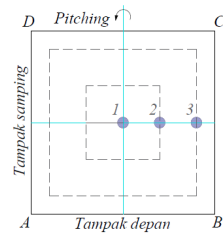


(b)

**Gambar 33** (a) Grafik Posisi EMVA terhadap Reduksi Respon Translasi Variasi Amplitudo Eksitasi 0,03m; (b) Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*

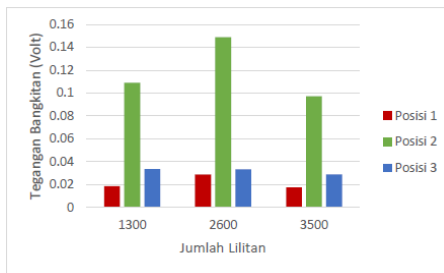


(a)

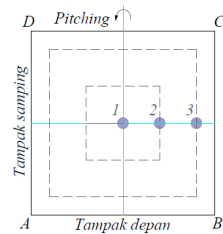


(b)

**Gambar 34** (a)Grafik Posisi EMVA terhadap Reduksi Respon *Pitching* Variasi Amplitudo Eksitasi 0,03m; (b)Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*



(a)



(b)

**Gambar 35** (a)Grafik Jumlah Lilitan EMVA terhadap Tegangan Bangkitan yang Dihasilkan Variasi Amplitudo Eksitasi 0,03m; (b)Skema Posisi Peletakan EMVA pada Plat *Exciter*



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- Ali, S., & Adhikari, S. (2013). Energy Harvesting Dynamic Vibration Absorbers. *Journal of Applied Mechanics, ASME*, 80(4), 041104.
- B.Williams, C., & Yates, R. B. (1995). Analysis of a Micro-electric Generator for Microsystems. *Proc. Transducers/Euroensors IX Vol. 1*, 369-372.
- B.Williams, C., Shearwood, C., Harradine, M. A., Mellor, P. H., Birch, T. S., & Yates, R. B. (2001). Development of an Electromagnetic Micro-generator. *Proc. Inst. Elect. Eng. Circuits, Devices Syst., Vol. 148, No. 6*, 337-342.
- Beeby, S. P., Tudor, M. J., & White, N. M. (2006). Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Meas. Sci. Technol., vol. 17, no. 12*, 175-195.
- Ch., M., & Ali, S. F. (2016). Energy Harvesting from Vibration Absorber under Random Excitations. *IFAC (International Federation of Automatic Control) Hosting by Elsevier Ltd.*
- Deutschman Aaron D. (1975). *Machine Design Theory and Practice*. New York: Macmillan Publishing Co., Inc.
- Fakhrudi, Y. A. (2016). Studi Karakteristik Model Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PTLG) Tipe Pengungkit-Generator Linier dan

Generatot Rotary dengan Variasi Volume Pelampung. *Master Thesis*.

- Franchek, M., Ryan, M., & R.J. Bernhard. (1995). Adaptive Passive Vibration Control. *Journal of Sound and Vibration* 189, 565-585.
- Hartog, J. (1985). Mechanical Vibrations. *Dover Publications, NewYork*.
- Holmes, A. S., Hong, G., & Pullen, K. R. (2005). Axial-flux Permanent Magnet Machines for Micropower Generation. *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 14, No. 1, 54-62.
- Jie, L., & Kefu, L. (2006). A Tunable Electromagnetic Vibration Absorber: Characterization and Application. *Journal of Sound and Vibration* 295, 708–724.
- Khaligh, A. (2010). Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 3, 850.
- Mizuno, T., & Araki, K. (1993). Control System Design of a Dynamic Vibration Absorber with an Electromagnetic Servomechanism. *Mechanical Systems and Signal Processing* 7, 293-306.
- Ormondroyd, J., & Hartog, J. (1928). Theory of The Dynamic Vibration Absorber. *Transactions of The*

*American Society of Mechanical Engineers, 50, 9-22.*

Paradiso, J. A., & Starner, T. (2005). Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics. *Pervasive Comput. Vol. 4, No. 1*, 18-27.

Rachman, A. (2017). Studi Eksperimental Reduksi Respon Getaran Translasi dan Energi Listrik Bangkitan Sistem Utama oleh Mekanisme Cantilever Piezoelektrik Double Vibration Absorber. *Tugas Akhir*.

Rao, S. S. (2011). *Mechanical Vibration 5th Edition*. Amerika: Prentice Hall.

Roundy, S., Wright, P. K., & Rabaye, a. J. (2003). A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Comput. Commun., vol. 26, no. 11*, 1131-1144.

Sasaki, K., Osaki, Y., Okazaki, J., Hosaka, H., & Itao, K. (2005). Vibration-based Automatic Power Generation System. *Microsyst. Technology, Vol. 11, No. 8-10*, 965-969.

Syahir, H. (2018). Validasi Reduksi Getaran dan Energi Listrik yang Dihasilkan Mekanisme Cantilever Piezoelektrik Vibration Absorber (CPVA). *Tugas Akhir*.

Trimboli, M., Wimmel, R., & Breitbach, E. (1994). A quasi-active Approach to Vibration Isolation Using Magnetic Springs. *SPIE 2193*, 73-83.

Wiegele, T. G. (1996). Micro-turbo Generator Design and Fabrication: A Preliminary study. *Proc. 31st IECEM*, 2308-2313.

## BIODATA PENULIS



**Kartika Firdausi** dilahirkan di Jombang, 19 Mei 1996 dari orangtua yang bernama Nashrullah Dwi Yuswono dan Elly Rahayu Prihatin serta memiliki seorang saudara perempuan bernama Daniar Seri Firdausi. Penulis menempuh pendidikan usia dini di TK Pertiwi Perak-Jombang. Pendidikan formal yang telah ditempuh penulis antara lain: SDN Perak I pada tahun 2002-2008, SMP Negeri 2 Jombang pada tahun 2008-2011 dan SMA Negeri 2 Jombang. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi negeri di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, program studi S-1 Teknik Mesin, melalui jalur SNMPTN.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non akademik di lingkungan kampus Teknik Mesin. Dalam kegiatan akademik, penulis aktif menjadi grader mata kuliah Dinamika Teknik dan Asisten Praktikum mata kuliah Mekanika Getaran. Dalam kegiatan non akademik, penulis aktif sebagai staf organisasi Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) periode kepengurusan 2015-2016 dan sekretaris Departemen Umum HMM periode kepengurusan 2016-2017. Selain itu, penulis juga aktif kepanitian dalam berbagai kegiatan jurusan hingga institut pada tahun ke-2 perkuliahan. Penulis juga aktif dalam mengikuti kompetisi di bidang minat bakat cabang olahraga futsal, basket dan voli, serta memperoleh juara 1

untuk cabang olahraga voli *Rector Cup* dan pertandingan di lingkup fakultas atas nama Departemen Teknik Mesin.

Motto hidup penulis adalah “*Let it flow and wait till it glow*” yang menjadikan penulis selalu bertanggung jawab atas pilihannya, menjalani dengan ikhlas dan menyelesaikan segala hal yang telah dimulai hingga mendapatkan hasil yang terbaik. Untuk informasi dan masukan terkait Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email [kfucha@gmail.com](mailto:kfucha@gmail.com).

